

**Орбитально-ориентированные протяжённые дисперсные структуры:
концепция формирования искусственного внешнего траекторного механизма
для движения космических аппаратов**

Расширенная постановочная инженерно-физическая работа с
первым ограниченным расчётным сценарием

Автор: Сергей Миронов

Статус: независимый исследователь

Тип документа: расширенная работа монографического типа

Редакция: v1.2

Год: 2026

Языковая пометка:

Английская версия является переводом. Оригинальной и основной является
версия на русском языке.

Июнь 2026

Оглавление

Аннотация	4
Часть I. Теоретическое описание орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры	6
1. Орбитально-ориентированные протяжённые дисперсные структуры как объект исследования	6
2. Баллистическая навигация как предел масштабирования	7
3. Дисперсная структура как искусственный внешний траекторный механизм	10
4. Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура: определение и принцип действия	16
5. Физический режим орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры	20
6. Кинетическая аэродинамика аппарата в направленной дисперсной среде	30
7. Полезное действие, эрозионная цена и защитная компоновка аппарата	40
8. Условия формирования орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры	47
9. Дegradaция как потеря эксплуатационных параметров	50
10. Замедление деградации и компенсация потерь	62
11. Инфраструктурная значимость долговечности	64
Часть II. Производственно-логистический узел формирования структуры	68
12. Производственно-логистический узел: понятие, назначение и место в концепции	68
13. Узкие места космической добычи и роль производственно-логистического узла	71
14. Малые тела и главный пояс астероидов как база производственно-логистического узла	77
15. Функциональный состав производственно-логистического узла	82
16. Операционный цикл формирования структуры	93
17. Базовые расчётные критерии производственно-логистического узла	97
18. Инфраструктурное значение производственно-логистического узла	108
Часть III. Первый ограниченный расчётный сценарий формирования структуры	114
19. Переход от общей постановки к первому расчётному сценарию	114
20. Расчётная область, исходная конфигурация и допущения первого сценария	119
21. Локальное накопление, упаковка и подача дисперсного вещества	125
22. Что доставляется с Земли и что формируется локально	144
23. Масса вещества, плотность среды и геометрия первого участка	155
24. Формирование минимального участка структуры	166
25. Сравнение режимов движения: гомановский переход, высокоэнергетическая траектория и траектория со структурой	172
26. Механизмы инфраструктурного выигрыша: импульс, коррекции, окно входа, стабилизация и баллистическое накопление	189

27.	Орбитально-геометрическая постановка первого участка.....	204
28.	Циклы доставки, скоростного распыления и высвобождения вещества.....	207
29.	Срок формирования первого участка, чувствительность к параметрам и критерий расширения.....	230
30.	Обслуживание, восстановление и первый срок эксплуатации участка.....	244
Часть IV. Итоги постановочной работы, границы настоящей версии и заключение		251
31.	Основные результаты постановочной работы, границы настоящей версии и направления проверки	251
32.	Заключение	260
Приложение А. Список использованных источников		264
Приложение Б. Словарь обозначений и параметров.....		265
Контакты и обсуждение.....		274

Аннотация

В работе рассматривается концепция орбитально-ориентированных протяжённых дисперсных структур как искусственно формируемого внешнего траекторного механизма для движения космических аппаратов. Такой механизм понимается не как двигатель аппарата и не как естественное пылевое облако, а как заранее создаваемая, измеряемая и обслуживаемая дисперсная среда, способная изменять условия прохождения ограниченного участка траектории. Выражение «пылевые дороги», использовавшееся в предыдущей версии как предварительная метафора, в настоящей версии заменяется более точным понятием, отражающим протяжённость объекта, его дисперсный состав, управляемость и согласование с орбитальной динамикой.

Исходная постановка работы состоит в том, что масштабирование космических полётов за пределами режима единичных баллистических миссий требует не только совершенствования двигательных установок, баллистических схем, гравитационных манёвров и активного управления аппаратом, но и рассмотрения внешней инфраструктурной среды движения. Предлагаемый подход не заменяет классическую баллистику и не отменяет автономность космического аппарата, а дополняет их искусственно формируемым участком среды, в котором часть требований к коррекции, стабилизации, повторяемости прохождения и выходу на более энергичную орбитальную конфигурацию может быть перенесена с одиночного аппарата на заранее подготовленную дисперсную структуру.

Версия 1.2 оформляет рассматриваемую концепцию как постановочную инженерно-физическую работу с первым ограниченным расчётным сценарием. В отличие от предыдущей версии, где основное внимание уделялось качественной постановке идеи, в настоящей версии вводится система базовых критериев: физический режим дисперсной структуры, размерный диапазон частиц, концентрация, длина свободного пробега, число Кнудсена, фазовая и векторная согласованность, кинетическое взаимодействие с аппаратом, эрозионная цена, защитно-стабилизирующая компоновка, деградация и восстановление эксплуатационных параметров.

Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура в настоящей работе рассматривается не как естественное пылевое облако и не как пассивная область повышенной запылённости. Её инфраструктурные свойства возникают только при проектном задании состава, плотности, размерного диапазона, протяжённости, фазового разброса и орбитальной согласованности частиц. Поэтому объект анализа задаётся как связанная система: производственно-логистический узел — дисперсная структура — аппарат. Производственно-логистический узел обеспечивает получение, подготовку, фракционирование, накопление, упаковку, доставку и дозированное высвобождение вещества; дисперсная структура задаёт рабочий физический режим среды; аппарат взаимодействует с этой средой через рассчитанную кинетико-аэродинамическую и защитную компоновку.

В работе вводится понятие кинетической аэродинамики аппарата в направленной дисперсной среде. Под ним понимается не классическая аэродинамика сплошной газовой среды и не движение в пустом вакууме, а расчётное взаимодействие аппарата с направленным статистическим потоком частиц в разреженной дисперсной среде. Рассматриваются поток частиц на корпус, частота столкновений, импульсная нагрузка, интегральный импульс, изменение скорости

аппарата, тепловая нагрузка, эрозионная цена и связь этих параметров с формой аппарата, эффективной площадью взаимодействия, относительной скоростью и допустимым режимом прохождения структуры.

Отдельно рассматривается вопрос полезного действия структуры. В работе подчёркивается, что её значение не сводится к прямой замене двигателя или к простой экономии топлива. Инфраструктурный смысл орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры состоит в создании внешнего режима движения, где часть требований к точности входа, малым коррекциям, демпфированию, стабилизации, повторяемости прохождения и выходу на высокоэнергетическую орбитальную конфигурацию переносится с одиночного аппарата на заранее подготовленную среду. При этом любое полезное воздействие рассматривается совместно с эрозионной, тепловой и эксплуатационной ценой такого взаимодействия.

Производственно-технологическая часть работы показывает, что формирование структуры не может быть сведено к разовому выбросу вещества. Для создания рабочей среды необходим организованный цикл подготовки, накопления, упаковки, доставки, высвобождения и последующей диагностики дисперсного вещества. При этом первый ограниченный сценарий не требует немедленной зрелой астероидной промышленности: часть ключевых операций, включая подготовку рабочей фракции, может быть выполнена заранее, тогда как локальная добыча и переработка вещества рассматриваются как направление последующего масштабирования.

Практическая часть работы рассматривает первый ограниченный расчётный сценарий формирования участка структуры. В ней оцениваются порядок длины участка, плотности среды, массы рабочей фракции, объёма подготовленного вещества, схемы формирования, числа проходов, роли квазипараллельного распыления, обслуживания и возможного перехода от первого сегмента к более развитой инфраструктурной системе. Показано, что первый участок не требует мегатонн вещества и может быть рассмотрен в диапазоне десятков тонн рабочей фракции с технологическим резервом, что переводит задачу из области неопределённой мегаструктуры в область крупного, но предметно обсуждаемого инфраструктурного сценария.

Задача настоящей работы состоит в постановке инженерно-физической задачи формирования орбитально-ориентированных протяжённых дисперсных структур как искусственной инфраструктурной среды для движения космических аппаратов и в задании первого расчётно-критериального сценария их возможного формирования и применения. Эта постановка раскрывается через систему базовых критериев, описывающих физический режим дисперсной среды, её взаимодействие с аппаратом, геометрическое согласование, долговечность, обслуживание и инфраструктурную значимость таких структур. Указанные критерии задают основу, без которой последующая количественная модель, траекторная проверка и экспериментальная валидация не могут быть построены.

Ключевые слова: орбитально-ориентированные протяжённые дисперсные структуры; постановочная инженерно-физическая работа; расчётный сценарий; искусственная инфраструктурная среда; космические аппараты; кинетическая аэродинамика; направленная дисперсная среда; эрозионная цена; защитно-стабилизирующий модуль; производственно-логистический узел; космическая инфраструктура; масштабирование космических полётов.

Часть I. Теоретическое описание орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры

1. Орбитально-ориентированные протяжённые дисперсные структуры как объект исследования

Современная межпланетная космонавтика основана на баллистической навигации, при которой движение космических аппаратов определяется гравитационным полем Солнечной системы и начальными условиями разгона. Для перелётов между планетами используются орбитальные переходы, в том числе траектории гомановского типа, а также гравитационные манёвры, позволяющие изменять параметры движения за счёт взаимодействия с массивными телами.

Данный подход доказал свою работоспособность для единичных миссий, однако обладает фундаментальными ограничениями при попытке масштабирования. Баллистические траектории существенно увеличивают длину пути по сравнению с геометрически минимальным расстоянием между объектами, жёстко привязывают запуски к взаимному положению планет и требуют высокой точности навигации, при которой малые отклонения параметров приводят к формированию иной орбиты и потере миссии.

В результате баллистическая навигация, оставаясь фундаментальной основой межпланетного движения, сталкивается с ограничениями при переходе к регулярному, плотному и массовому межпланетному трафику. Она эффективна как метод энергетически рационального перелёта, но сама по себе не создаёт обслуживаемую транспортную инфраструктуру.

В настоящей работе рассматривается возможность строительства специализированной инфраструктуры движения в межпланетном пространстве, расширяющей возможности баллистической навигации и предназначенной для регулярных и масштабируемых перелётов. Такой подход предполагает предварительные капитальные вложения инфраструктурного характера, сопоставимые с крупными космическими программами, при сохранении совместимости с существующими методами движения.

В настоящей версии данная постановка уточняется терминологически и инженерно-физически. Выражение «пылевые дороги», использовавшееся в предыдущей версии как предварительная метафора, заменяется понятием **орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры**. Новый термин точнее отражает физическую природу рассматриваемого объекта: его протяжённость, дисперсный состав и согласование с орбитальной динамикой.

Под орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структурой в настоящей работе понимается искусственно формируемая и поддерживаемая дисперсная структура с согласованными орбитальными параметрами и контролируемым распределением вещества, предназначенная для формирования искусственной инфраструктурной среды движения космических аппаратов.

В работе предлагается рассматривать инфраструктурное обеспечение как необходимое условие масштабирования космических полётов за пределами режима единичных баллистических миссий. Классическая баллистическая навигация сохраняет фундаментальное значение, однако при масштабировании космических полётов её ограничения становятся инфраструктурной проблемой.

Предлагаемый подход не заменяет баллистику, а дополняет её искусственно формируемой средой, требующей капитальных затрат на этапе создания, но потенциально упрощающей последующее движение аппаратов и создающей дополнительные инфраструктурные преимущества при регулярном использовании выбранных направлений.

Версия 1.2 задаёт исходную систему базовых критериев, на основе которых может строиться последующее количественное моделирование орбитально-ориентированных протяжённых дисперсных структур. В отличие от предыдущей версии, где основное внимание уделялось качественной постановке идеи, версия 1.2 оформляет рассматриваемую концепцию как постановочную инженерно-физическую работу с расчётным сценарием. В ней задаются базовые критерии режима среды, взаимодействия с аппаратом, геометрического согласования, долговечности, обслуживания и инфраструктурной значимости.

2. Баллистическая навигация как предел масштабирования

Баллистическая навигация представляет собой режим движения, при котором после завершения активной фазы разгона космический аппарат в основном следует орбитальной динамике, определяемой гравитационным полем центрального тела и планет. Траектория в этом случае является решением задачи небесной механики с жёстко заданными начальными условиями.

Энергетическая эффективность такого подхода достигается ценой геометрических ограничений. Прямолинейное перемещение между двумя точками межпланетного пространства практически не является энергетически рациональным без постоянного активного разгона или внешней инфраструктурной поддержки. Аппарат вынужден двигаться по вытянутым эллиптическим или спиральным траекториям, существенно превышающим минимальное расстояние между объектами. Классическим примером такого подхода является гомановский переход, при котором перелёт между двумя орбитами осуществляется через эллиптическую переходную траекторию и требует определённого взаимного положения исходного и целевого тел.

В условиях чистого вакуума отсутствуют направляющие и стабилизирующие элементы. Любое ускорение, не совпадающее строго с расчётной траекторией, приводит не к локальной ошибке, а к формированию новой орбиты. Даже незначительные отклонения параметров скорости или направления требуют длительных коррекций и усложняют навигацию. В инфраструктурном контексте это означает, что требования к точности навигации и частоте коррекций растут быстрее, чем пропускная способность системы, что ограничивает масштабирование “баллистической” логистики.

Для изменения траектории применяются гравитационные манёвры, позволяющие перераспределять импульс за счёт взаимодействия с движением массивных тел. Несмотря на снижение прямых энергетических затрат, такие манёвры сопровождаются увеличением длины маршрута, усложнением геометрии движения и жёсткой привязкой к синодическим периодам планет. В результате характерные времена межпланетных перелётов достигают месяцев и лет. NASA описывает гравитационный манёвр как способ добавить или уменьшить импульс аппарата за счёт пролёта около планеты.

Орбитально-ориентированную протяжённую дисперсную структуру не следует отождествлять с двигателем аппарата. Её ближний функциональный аналог находится не среди бортовых двигательных установок, а среди внешних траекторных механизмов, изменяющих условия движения аппарата за счёт взаимодействия с внешней средой или полем. Подробное место такой структуры в системе средств движения рассматривается в следующей главе.

Таким образом, баллистическая навигация представляет собой естественный, но инфраструктурно ограниченный режим организации движения. Она обеспечивает выполнение отдельных миссий, но при масштабировании сталкивается с трудностями обеспечения высокой пропускной способности, регулярности запусков и повторяемости траекторных режимов, необходимых для формирования межпланетной транспортной инфраструктуры.

В настоящей работе предлагается рассматривать орбитально-ориентированную протяжённую дисперсную структуру не как замену баллистической навигации, а как инфраструктурное дополнение к ней. Орбитальная механика сохраняет фундаментальное значение: аппарат по-прежнему движется в гравитационном поле Солнечной системы, а его траектория должна рассчитываться в рамках небесной механики. Однако в выбранной области движения может быть сформирована искусственная среда, в которой параметры взаимодействия аппарата с окружающим веществом задаются заранее.

Такой подход меняет не физические законы движения, а инженерную организацию участка траектории. Вместо полностью “пустого” фрагмента пространства появляется область с заданной концентрацией частиц, допустимым размерным составом, векторной согласованностью и рабочим режимом взаимодействия. Поэтому структура в дальнейшем рассматривается как искусственная траекторная среда: внешний участок, который может снижать цену высокоэнергетического режима, уменьшать требования к коррекциям, помогать при торможении у цели и повышать повторяемость прохождения аппаратов сходного класса.

На уровне настоящей постановочной работы эти преимущества следует понимать не как доказанные эксплуатационные характеристики готовой системы, а как инженерные функции, ради которых вводится рассматриваемый класс структур.

В таком смысле основные потенциальные преимущества среды могут быть выражены следующим образом:

— **выход на высокоэнергетическую траекторию через заранее подготовленный участок движения.** Структура может использоваться не как линия между двумя планетами, а как направляющая среда, помогающая аппарату выйти на более энергичную орбитальную конфигурацию с меньшими требованиями к начальному импульсу, точности наведения и последующей коррекции. В отдельных схемах взаимодействие со структурой может брать на себя специализированный разгонно-направляющий блок, первая ступень или защитно-аэродинамический модуль, после чего основная часть аппарата продолжает движение по высокоэнергетической баллистической или корректируемой траектории уже в почти пустом пространстве;

— **формирование допустимого коридора движения.** Аппарат проходит не через полностью пустое пространство, а через область с расчётно заданными параметрами вещества, где положение, направление и скорость могут удерживаться в допустимом фазовом диапазоне;

— **снижение чувствительности к малым отклонениям.** Часть поперечных возмущений и ошибок начального наведения может быть демпфирована средой, если аппарат и структура рассчитаны как связанная инженерная система;

— **стабилизация ориентации и режима движения.** При наличии усиленной фронтальной области, направляющих поверхностей, хвостовых или крылоподобных элементов поток частиц может создавать не только нагрузку, но и стабилизирующий момент, если геометрия аппарата рассчитана под данный режим. Физический механизм такого взаимодействия далее рассматривается в главе 6 через понятие кинетической аэродинамики аппарата в направленной дисперсной среде;

— **снижение требований к универсальности аппарата.** Если взаимодействие со средой выполняет специализированный блок, то полезная нагрузка, научный модуль или основной транспортный аппарат не обязаны полностью соответствовать кинетико-аэродинамическому классу. Им достаточно быть защищёнными на этапе прохождения структуры либо находиться за защитным или направляющим модулем;

— **повышение повторяемости движения.** Один и тот же участок структуры может использоваться многократно аппаратами сходного класса или аппаратами с совместимыми разгонно-направляющими блоками. Преимущество состоит в том, что структура не расходует полностью после первого прохода и может сохранять функцию после серии проходов при условии, что её параметры остаются в рабочем диапазоне или восстанавливаются обслуживанием;

— **снижение зависимости от редких стартовых окон и точечных манёвров.** Если часть движения переносится в заранее подготовленную область с допустимым фазовым коридором, то требования к отдельному идеальному стартовому моменту и отдельной точной коррекции могут быть снижены;

— **локальная адаптация структуры под разные режимы движения.** Структура не обязана быть одинаковой по всей протяжённости. Отдельные участки могут иметь разные параметры концентрации, размерного состава, фазового разброса и допустимой относительной скорости: одни — лучше подходят для разгонно-направляющих блоков, другие — для малотяговых аппаратов, третьи — для мягкого входа или выхода из структуры. При этом такие режимы не являются взаимоисключающими: речь идёт не о запрете движения иных типов аппаратов, а о том, что конкретный участок структуры может быть оптимизирован под определённый класс движения и оставаться допустимым для других режимов при выполнении их ограничений;

— **переход от единичной миссии к обслуживаемой системе движения.** В баллистической схеме каждый перелёт во многом проектируется как отдельная задача. В инфраструктурной схеме часть сложности переносится с каждого отдельного аппарата на заранее созданную и поддерживаемую среду: параметры участка движения можно измерять, корректировать, восстанавливать и использовать повторно.

Эти преимущества не должны пониматься как утверждение о готовой технической реализации. Они задают инженерную мотивацию дальнейшего анализа и определяют круг параметров, которые должны быть переведены из качественной идеи в расчётно-критериальную постановку. Чтобы такая среда действительно могла выполнять инфраструктурную функцию, необходимо определить её физический режим, параметры дисперсного вещества, условия взаимодействия с

аппаратом, требования к защитно-стабилизирующей компоновке, долговечность структуры и способы её обслуживания.

3. Дисперсная структура как искусственный внешний траекторный механизм

После рассмотрения ограничений баллистической навигации необходимо уточнить место орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры в общей системе средств межпланетного движения. В предыдущей главе было показано, что такая структура должна пониматься не как бортовая двигательная установка, а как искусственно создаваемая внешняя среда, способная изменить условия прохождения выбранного участка траектории.

Поэтому задача настоящей главы состоит не в повторном противопоставлении структуры двигателю, а в её функциональной классификации. Для этого рассматриваются три класса средств изменения траектории: собственные средства аппарата, естественные внешние механизмы и искусственные внешние механизмы.

К первому классу относятся двигатели, запасы топлива, системы ориентации и коррекции, находящиеся на борту аппарата. Ко второму — гравитационные манёвры, аэродинамическое торможение и иные способы использования уже существующих внешних условий. К третьему классу в настоящей работе относится орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура: не природная среда и не двигатель, а заранее формируемый внешний участок, параметры которого задаются проектно и могут использоваться повторно аппаратами сходного класса.

Гравитационный манёвр как естественная внешняя помощь

Наиболее понятным примером внешнего траекторного механизма является гравитационный манёвр. При таком манёвре аппарат использует гравитационное поле и движение массивного тела. Аппарат не создаёт весь эффект собственным двигателем: часть изменения скорости, направления или энергии орбиты возникает за счёт взаимодействия с внешней небесно-механической системой.

В практической космонавтике гравитационный манёвр давно используется как способ изменить параметры движения без полного переноса этой задачи на запас топлива аппарата. При этом аппарат сохраняет двигатель, навигацию, коррекции и собственную систему управления: внешний механизм не отменяет бортовые средства, а дополняет их.

Это сравнение важно для настоящей работы методологически. Если дисперсную структуру оценивать только как слабую замену бортового двигателя, постановка оказывается искажённой. Такая структура ближе не к двигательной установке аппарата, а к классу внешних траекторных средств. Как и гравитационный манёвр, она не обязана заменять двигатель. Её задача состоит в другом: изменить цену, устойчивость или доступность выбранного режима движения.

Отличие дисперсной структуры от гравитационного манёвра

Физически дисперсная структура не является аналогом гравитационного манёвра. Гравитационный манёвр использует поле массивного тела и его движение по

орбите. Дисперсная структура использует кинетическое взаимодействие аппарата с заранее подготовленной направленной средой частиц.

Поэтому нельзя утверждать, что дисперсная структура “работает как гравитационный манёвр”. Это было бы неточно. Корректнее сказать иначе: оба механизма относятся к классу внешней помощи траектории, но используют разные физические основания.

Гравитационный манёвр является естественным внешним механизмом. Он существует только там, где есть подходящее массивное тело, подходящая геометрия пролёта, допустимое окно и приемлемая траекторная цена входа в манёвр.

Дисперсная структура является искусственным внешним механизмом. Она может быть создана в заранее выбранной области, ориентирована под определённый класс траекторий, обслуживаться, корректироваться и использоваться многократно аппаратами сходного класса.

Это различие задаёт сильную и слабую стороны каждого механизма. Гравитационный манёвр может давать крупный эффект, но привязан к массивным телам и геометрии их движения. Дисперсная структура, вероятно, даёт меньший прямой импульсный вклад, особенно в первом ограниченном сценарии, но может быть размещена и настроена как инфраструктурный объект в нужной зоне движения.

Почему структура не конкурирует с двигателем

Двигатель аппарата создаёт управляемый импульс за счёт расхода бортового топлива или рабочего тела. Он является внутренним средством движения. Его преимущества — управляемость, автономность, повторяемость команд и возможность работы без внешней среды. Его недостаток — ограниченность запасом массы, топлива, энергии и ресурса.

Дисперсная структура не обладает такой автономностью. Она не может произвольно включаться на борту аппарата и не может заменить двигатель во всех режимах. Но она способна снизить нагрузку на двигатель в заранее выбранной области: уменьшить часть коррекционной цены, помочь входу в рабочий коридор, стабилизировать прохождение, снизить цену торможения у цели или облегчить выход на высокоэнергетическую траекторию.

Поэтому сравнение “двигатель против дисперсной структуры” некорректно. Правильнее сравнивать два режима:

- высокоэнергетическая траектория без подготовленной внешней среды;
- высокоэнергетическая траектория с подготовленной внешней средой.

В первом случае вся дополнительная цена быстрого режима ложится на аппарат, его разгонный блок, запас топлива, навигацию и коррекции. Во втором случае часть этой цены может быть перенесена на обслуживаемую инфраструктурную среду.

Именно это позволяет использовать быстрые траектории чаще. Структура не делает их бесплатными, но снижает их цену. А снижение цены высокоэнергетического режима является условием масштабирования: если быстрый режим становится менее дорогим для каждого аппарата, он может применяться не как исключительный разовый манёвр, а как повторяемый элемент транспортной системы.

Сравнение с аэродинамическим торможением

Ещё один полезный внешний механизм — аэродинамическое торможение. При входе в атмосферу планеты или при аэроторможении аппарат использует сопротивление среды для снижения скорости. В этом случае торможение создаётся не только двигателем, а взаимодействием с внешней средой.

Этот пример особенно близок к тормозно-входной функции дисперсной структуры. В обоих случаях аппарат проходит через среду, получает нагрузку, платит тепловую и эрозионную цену, но может уменьшить потребность в собственном тормозном импульсе.

Однако различия также принципиальны. Атмосфера является естественной средой массивного тела. Она плотнее, сильно неоднородна по высоте, связана с тепловыми перегрузками и не может быть свободно размещена в произвольной области межпланетного пространства. Дисперсная структура, напротив, должна быть искусственно сформирована, имеет намного меньшую плотность, работает на ограниченном участке и требует обслуживания. Её задача — не имитировать атмосферу, а создать более слабую, управляемую и орбитально согласованную среду взаимодействия.

Поэтому дисперсную структуру можно рассматривать как межпланетный аналог внешней средовой помощи, но не как атмосферу и не как аэродинамическое торможение в классическом смысле. Она использует общую идею взаимодействия аппарата со средой, но реализует её в разреженном, направленном и искусственно организованном режиме.

Дисперсная структура как искусственная средовая инфраструктура

Дисперсная структура занимает промежуточное положение между естественным внешним механизмом и технической системой. С одной стороны, она является средой, расположенной вне аппарата. С другой стороны, она не является естественной случайной средой, поскольку её параметры должны быть заданы проектно.

Она должна иметь:

- заданный размерный диапазон частиц;
- допустимую плотность;
- контролируемую протяжённость;
- векторную согласованность движения частиц;
- ограниченный фазовый разброс;
- рабочее окно входа;
- допустимый режим взаимодействия с аппаратом;
- возможность диагностики;
- возможность обслуживания и восстановления.

Именно поэтому такая структура является не просто “пылью в космосе”, а искусственной средовой инфраструктурой. Её полезность возникает не из самого факта наличия вещества, а из проектной организации этого вещества.

Если частицы распределены случайно, среда остаётся риском. Если частицы имеют неправильную фракцию, среда становится эрозионной опасностью. Если нет векторной согласованности, аппарат взаимодействует с хаотическим потоком. Если нет диагностики, невозможно отличить рабочий участок от неуправляемого

облака. Если нет обслуживания, структура быстро теряет инфраструктурный смысл.

Следовательно, дисперсная структура становится внешним траекторным механизмом только при выполнении проектных условий. Её статус задаётся не веществом как таковым, а контролем над веществом.

Функциональное сравнение трёх классов средств

Для прояснения статуса дисперсной структуры полезно сравнить три класса средств движения и изменения траектории.

Первый класс — бортовые двигательные средства. Они находятся на аппарате, расходуют его топливо или рабочее тело и создают управляемый импульс. Их преимущество — автономность и непосредственное управление. Их ограничение — масса топлива, энергетика, ресурс и стоимость каждого манёвра.

Второй класс — естественные внешние механизмы. Сюда относятся гравитационные манёвры и аэродинамическое торможение. Они используют уже существующую среду или поле: гравитацию планеты, движение массивного тела, атмосферу. Их преимущество — возможность получить крупный эффект без полного расхода бортового топлива. Их ограничение — привязка к естественным условиям, окнам, геометрии, рискам входа и невозможность свободно разместить такой механизм там, где он нужен.

Третий класс — искусственные внешние механизмы. В настоящей работе к нему относится орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура. Она создаётся не природой, а производственно-логистическим узлом и распылителями. Её преимущество — проектируемость, обслуживаемость, повторяемость и возможность настройки под определённый класс аппаратов. Её ограничение — необходимость формирования, диагностики, поддержания и учёта эрозионной цены.

Таким образом, дисперсная структура не заменяет первые два класса. Она добавляет третий класс — искусственную внешнюю траекторную инфраструктуру.

Совместимость с гравитационными манёврами

Сравнение с двигателями и гравитационными манёврами не означает конкуренции. Напротив, в практической миссионной архитектуре все три класса механизмов могут использоваться совместно, дополняя друг друга на разных этапах движения.

Гравитационный манёвр может давать крупное изменение скорости или направления за счёт пролёта около массивного тела. Дисперсная структура может дополнительно выполнять более локальные функции: стабилизировать вход, снизить часть коррекционной цены, подготовить выход на высокоэнергетическую дугу, помочь торможению у цели или расширить допустимое окно прохождения.

В сложной миссионной архитектуре аппарат может использовать несколько механизмов последовательно. Например, двигатель выводит аппарат на исходную траекторию, гравитационный манёвр меняет энергию или направление, а дисперсный участок снижает цену входа, стабилизации, коррекций или торможения в заранее выбранной зоне.

Такой подход особенно важен для дальних направлений. Чем длиннее маршрут и чем больше последующий баллистический участок, тем выше значение ранних коррекций, внешней помощи и точного выхода на нужную траекторную конфигурацию. Поэтому совокупный вклад гравитационных манёвров, двигателей,

малотяговых систем и дисперсной инфраструктуры может быть больше, чем вклад каждого механизма по отдельности.

Это уточнение защищает концепцию от ложного противопоставления. Дисперсная структура не должна доказывать, что она “лучше” гравитационного манёвра. Её задача — показать, что она может быть ещё одним элементом внешней траекторной помощи, особенно там, где естественного массивного тела нет, гравитационный манёвр неудобен или требуется повторяемая инфраструктурная зона.

Ограниченность прямого импульса и значение совокупного эффекта

Чтобы избежать смешения разных величин, необходимо ввести отдельное обозначение для прямого импульсного вклада дисперсной среды. В настоящей работе он обозначается как Δv_{dust} , где Δv означает изменение скорости аппарата, а индекс dust указывает, что это изменение связано именно с прохождением через дисперсную структуру. Это не весь межпланетный Δv миссии и не импульс двигателя, а только та малая часть изменения скорости, которая возникает при взаимодействии аппарата с направленным потоком частиц.

Первый дисперсный участок, вероятно, не даст большого прямого Δv_{dust} . Поэтому его полезность не должна оцениваться только через эту величину. Прямой импульсный вклад является лишь одним из компонентов инфраструктурного эффекта.

Внешние траекторные механизмы оцениваются не только по локальному воздействию, но и по изменению последующего движения. Гравитационный манёвр важен не как “сила в одной точке”, а как изменение всей дальнейшей траектории после пролёта. Аналогично дисперсный участок должен оцениваться по тому, как взаимодействие со средой меняет последующий баллистический или корректируемый участок движения.

Совокупный эффект структуры включает:

- прямой импульсный вклад;
- снижение коррекционной цены;
- расширение окна входа;
- стабилизацию прохождения;
- снижение тормозной цены у цели;
- уменьшение требований к запасу рабочего тела;
- повторяемость для серии аппаратов;
- баллистическое накопление результата после выхода.

Именно поэтому структура должна оцениваться не как “слабый двигатель”, а как среда, изменяющая условия прохождения выбранного участка траектории.

Баллистическое накопление как общий принцип внешней помощи

Внешние траекторные механизмы важны не только тем, что дают локальное воздействие, но и тем, что это воздействие затем развивается на последующей траектории.

При гравитационном манёвре аппарат проходит ограниченную область около планеты, но результат пролёта проявляется на дальнейшем маршруте. При аэродинамическом торможении аппарат проходит через атмосферу ограниченное

время, но изменение энергии орбиты сохраняется после выхода из плотных слоёв. При прохождении дисперсной структуры аппарат также взаимодействует со средой ограниченно, а затем летит вне неё, сохраняя полученную коррекцию, стабилизацию или изменение скорости.

Поэтому дисперсная структура должна пониматься как локальный внешний участок, создающий долгий траекторный результат. Аппарат не должен взаимодействовать с дисперсной средой на всём межпланетном пути. Он проходит через неё ограниченный участок, получает изменение режима движения, затем выходит в почти пустое пространство, где полученный результат продолжает развиваться уже без дальнейшего контакта со средой.

Именно это делает сравнение с гравитационным манёвром логически полезным. В обоих случаях локальное внешнее взаимодействие используется ради последующего баллистического результата.

Из такого положения следует и критерий полезности структуры. Вопрос состоит не в том, заменяет ли она двигатель или гравитационный манёвр, а в том, снижает ли она цену выбранного режима движения, уменьшает ли требования к коррекциям, расширяет ли окно входа, помогает ли при торможении у цели, повышает ли повторяемость прохождения и оправдывает ли затраты на формирование и обслуживание участка. Именно эти критерии используются далее при рассмотрении практического сценария.

Методологическое значение сравнения

Сравнение с гравитационным манёвром важно не как доказательство эффективности структуры, а как способ правильно поставить вопрос.

Если структура рассматривается как двигатель, то первый вопрос будет: какой Δv она даёт одному аппарату и почему этот Δv лучше обычного двигателя. Такая постановка невыгодна и физически неточна.

Если структура рассматривается как внешняя траекторная помощь, вопрос становится другим: какую часть цены выбранного режима она может перенести с аппарата на среду, насколько это повторяемо, какова цена формирования среды и сколько аппаратов используют результат.

Это гораздо ближе к инфраструктурной логике работы. Гравитационный манёвр давно принят в космической практике не потому, что он является двигателем, а потому что он позволяет использовать внешнее небесно-механическое условие для изменения траектории. Дисперсная структура предлагает искусственный вариант внешнего условия: не массивное тело, а подготовленную среду.

Поэтому глава нужна для защиты терминологического и методологического статуса концепции. Она заранее показывает, что структура не конкурирует напрямую с двигателями и не должна оцениваться только по прямому импульсу. Её нужно оценивать как элемент внешней инфраструктуры движения.

Функциональное сравнение позволяет определить место дисперсной структуры среди средств изменения траектории, однако само по себе ещё не задаёт объект исследования. Поэтому следующим шагом необходимо перейти от обсуждения её роли и назначения к определению самой структуры, её основных признаков и принципа действия как искусственного внешнего траекторного механизма.

Итог главы

В настоящей главе орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура определена по своему функциональному статусу как искусственный

внешний траекторный механизм. Она не является двигателем аппарата, не заменяет баллистическую навигацию и не тождественна естественным внешним механизмам, таким как гравитационный манёвр или аэродинамическое торможение.

Её место состоит в дополнении общей транспортной архитектуры: двигатель обеспечивает активное управление, естественные внешние механизмы используют уже существующие поля и среды, а дисперсная структура создаёт искусственную внешнюю помощь в заранее выбранной области пространства. Поэтому её полезность должна оцениваться не только через прямой импульсный вклад, а через снижение цены выбранного режима движения, расширение окна входа, уменьшение коррекций, стабилизацию прохождения, помощь при торможении у цели и повторяемость использования участка.

Такое понимание подводит к следующему вопросу: что именно представляет собой орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура как физический объект. Поэтому далее рассматриваются её определение, основные признаки и принцип действия.

4. Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура: определение и принцип действия

Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура — это искусственно формируемая и поддерживаемая в выбранной области космического пространства дисперсная среда с согласованными орбитальными параметрами и контролируемым распределением вещества, предназначенная для создания искусственного внешнего траекторного механизма и формирования инфраструктурной среды движения космических аппаратов.

В таком определении важны три признака. Во-первых, структура является дисперсной средой, то есть её физический режим определяется частицами, их концентрацией, размерным составом и движением. Во-вторых, она является орбитально-ориентированной, то есть её параметры должны быть согласованы с выбранной областью пространства и с будущей траекторией аппарата. В-третьих, она является инфраструктурной, поскольку создаётся, измеряется, поддерживается и используется не как разовый выброс вещества, а как повторяемый внешний участок движения.

В связи с вышесказанным предпочтительными для первичного рассмотрения областями размещения таких структур являются зоны с относительно слабой гравитационной неоднородностью и низким уровнем внешних возмущений, поскольку близость к массивным телам, резкие градиенты гравитационного поля и плотные зоны манёвров повышают скорость рассеяния и усложняют поддержание согласованных орбитальных параметров частиц.

Такой областью может быть как протяжённое направление между крупными телами, так и орбитально выгодная зона, пригодная для долговременного размещения, обслуживания или повторяемого использования структуры. В пределах Солнечной системы в качестве первичных областей рассмотрения могут выступать участки межпланетного пространства с относительно стабильной орбитальной динамикой, области главного пояса астероидов, окрестности малых тел как источников вещества, а также орбитальные зоны, через которые проходят повторяемые направления движения аппаратов. Поэтому рассматриваемый

объект не сводится к линии между двумя планетами и не ограничивается частным случаем межпланетного перелёта.

В отличие от естественных пылевых облаков, зодиакального облака, кометных пылевых следов и иных дисперсных образований Солнечной системы, рассматриваемая структура задаётся не только наличием вещества, но и его инженерно определённой организацией. Для неё существенны протяжённость, распределение плотности, диапазон размеров частиц, орбитальная ориентация, устойчивость во времени и возможность обслуживания.

Естественные пылевые структуры Солнечной системы демонстрируют, что дисперсное вещество способно существовать не только в форме локальных облаков, но и в виде протяжённых полос, следов и распределённых областей, но сами по себе не являются прямым аналогом предлагаемой инфраструктурной среды.

Наблюдения IRAS выявили пылевые полосы и протяжённые зодиакальные структуры, связанные с естественными источниками вещества и последующей орбитальной эволюцией частиц. Такие структуры важны для настоящей работы как физический прецедент: они показывают, что дисперсное вещество в космическом пространстве может образовывать устойчивые и наблюдаемые распределения, а не только кратковременные случайные скопления¹.

Первым существенным параметром таких структур является **дисперсный состав**. Естественная пылевая среда не задаётся одной «средней» частицей: она включает частицы разных размеров, а их размерно-частотное распределение влияет на динамику, взаимодействие с излучением, столкновительную эволюцию и время существования структуры. Например, исследования размерно-частотного распределения зодиакального облака указывают на значимую популяцию частиц порядка 100 мкм и более около 1 а.е., а моделирование пылевых полос связано с учётом распределения частиц по размерам².

Для естественной структуры такое распределение является результатом источника вещества и последующей эволюции: столкновений, дробления, радиационных эффектов, гравитационных возмущений и ухода частиц из исходной области. Поэтому аппарат, проходящий через естественное облако или пылевой след, сталкивается не с проектируемой средой, а с внешней неопределённостью: размеры частиц, концентрация и фазовый разброс не согласованы с требованиями его движения. В такой ситуации дисперсная среда должна рассматриваться через наиболее опасные возможные фракции: даже если большая часть частиц мала, наличие более крупных включений превращает среду в фактор риска, поскольку аппарат должен быть рассчитан не на среднее, а на предельное воздействие.

¹ Analysis of IRAS Solar System Dust Data (Анализ данных IRAS о пыли в Солнечной системе). Источник интересен для подтверждения наблюдаемой структурированности пылевых полос и зодиакального облака.

<https://ntrs.nasa.gov/citations/19940006477>

² The Size–Frequency Distribution of the Zodiacal Cloud: Evidence from the Solar System Dust Bands (Размерно-частотное распределение зодиакального облака по данным пылевых полос Солнечной системы). Источник используется для описания размерного распределения частиц зодиакального облака и оценки вклада различных фракций в его массу и наблюдаемые свойства. Работа показывает, что существенная доля массы облака связана с частицами размером порядка десятков и сотен микрометров.

<https://archive.org/details/arxiv-astro-ph0005286>

В искусственной орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуре тот же параметр должен иметь иной статус: размерный диапазон частиц, концентрация и допустимая дисперсия скоростей становятся не пассивными свойствами среды, а проектируемыми величинами. Если диапазон частиц задан инженерно, среда становится принципиально более предсказуемой и может быть переведена в допустимый режим взаимодействия с аппаратом. За счёт исключения опасных фракций и поддержания заданного диапазона размеров дисперсное вещество перестаёт восприниматься как случайный поток угроз и становится средой с предсказуемым уровнем кинетического воздействия. Предсказуемость среды создаёт не только снижение риска, но и дополнительные инженерные преимущества: возможность заранее задавать допустимые режимы взаимодействия, рассчитывать форму корпуса, выбирать диапазон скоростей, проектировать защиту и использовать саму среду как фактор стабилизации движения.

Вторым существенным параметром является **протяжённость**. Естественные зодиакальные полосы, кометные пылевые следы и другие распределённые структуры показывают, что дисперсное вещество способно сохраняться на больших участках космического пространства³. Однако для аппарата сама по себе протяжённость не создаёт инфраструктурной функции. Напротив, протяжённая, но неконтролируемая пылевая область представляет более существенный риск, чем локальное возмущение, поскольку аппарат вынужден учитывать воздействие среды не в отдельной точке, а на значимом участке движения. В обычной инженерной логике такая область скорее становится зоной обхода или дополнительного экранирования, чем средой, к которой аппарат целесообразно приспособлять движение. Инфраструктурная функция возникает только тогда, когда протяжённость сочетается с контролируемостью: структура должна сохранять заданные параметры на существенном протяжении выбранного направления или в пределах выбранной орбитальной зоны.

В настоящей работе протяжённость рассматривается как задаваемый инженерный параметр. Искусственная структура должна быть протяжённой не просто геометрически, а функционально: рабочие параметры среды должны сохраняться на значимой части движения аппарата. Это означает, что концентрация частиц, диапазон их размеров, допустимый фазовый разброс и относительная скорость взаимодействия должны оставаться в пределах заданного режима не локально, а на протяжении участка, где среда должна выполнять инфраструктурную функцию. Непротяжённая структура создаёт отдельное возмущение; протяжённая, но неконтролируемая структура создаёт распределённый риск; протяжённая и контролируемая структура создаёт повторяемую среду движения.

Третьим параметром является **фазовая холодность структуры** (векторная согласованность движения частиц). Для предлагаемой концепции недостаточно контролировать только плотность и размерный состав. Частицы должны иметь

³ **A Study of Extended Dust Structures in the Zodiacal Cloud (Исследование протяжённых пылевых структур в зодиакальном облаке)**. Источник посвящён анализу протяжённых пылевых образований межпланетной среды, включая зодиакальные пылевые полосы, кометные пылевые следы и связанные с ними структуры, выявленные по данным IRAS. В настоящей работе используется как подтверждение существования устойчивых естественных протяжённых дисперсных структур в Солнечной системе и как пример формирования крупномасштабных пылевых образований, связанных с эволюцией малых тел.

<https://ntrs.nasa.gov/citations/19910005731>

согласованные орбитальные параметры и допустимый разброс скоростей, чтобы аппарат взаимодействовал не с хаотическим набором микропрепятствий, а с направленным статистическим потоком. Данные Juno важны именно в этом отношении: они показывают, что межпланетная пыль может регистрироваться аппаратом через реальные столкновения и что её пространственное распределение поддаётся анализу; зарегистрированные частицы относятся примерно к диапазону 1–100 мкм, что делает такие наблюдения полезными для перехода от оптического образа пылевой среды к её кинетическому воздействию на аппарат⁴.

В естественной среде вектор движения частиц задаётся происхождением вещества, орбитальной эволюцией и внешними возмущениями. В искусственной структуре этот параметр должен рассматриваться как один из основных проектируемых признаков. Согласованный вектор движения частиц и ограниченный фазовый разброс позволяют уменьшить случайность столкновений и перейти от режима «пыль как опасность» к режиму «пыль как управляемая среда взаимодействия». Именно поэтому орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура должна определяться не только через вещество и протяжённость, но и через согласованность орбитальных параметров частиц.

Такая структура не является универсальной средой движения. Её эксплуатационные свойства возникают только при согласовании параметров самой дисперсной структуры с параметрами аппарата, включая характерный размер, форму корпуса, ориентацию и относительную скорость. Поэтому объект анализа в настоящей работе задаётся не как изолированная пылевая среда, а как связанная система «дисперсная структура — аппарат».

Принцип действия орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры основан на создании протяжённой области с ненулевой концентрацией дисперсного вещества, орбитальные параметры которого согласованы с выбранным направлением движения или выбранной областью устойчивого размещения. Космический аппарат, движущийся внутри такой структуры, взаимодействует с частицами среды не как с отдельными случайными препятствиями, а как с направленным статистическим потоком, параметры которого должны быть заранее рассчитаны и ограничены допустимым диапазоном.

В этом смысле структура занимает промежуточное положение между движением в почти вакуумном пространстве и движением тела через среду, частицы которой оказывают измеримое кинетическое воздействие на его поверхность. Она не является атмосферой в газодинамическом смысле, однако создаёт ненулевое и воспроизводимое кинетическое взаимодействие аппарата с окружающим

⁴ Distribution of Interplanetary Dust Detected by the Juno Spacecraft and Its Contribution to the Zodiacal Light (**Распределение межпланетной пыли, зарегистрированной космическим аппаратом Juno, и её вклад в зодиакальное свечение**). Источник основан на регистрации межпланетных пылевых частиц космическим аппаратом Juno во время перелёта от Земли к Юпитеру. Полученные данные использованы для оценки пространственного распределения межпланетной пыли и её вклада в зодиакальное облако. В настоящей работе источник используется как подтверждение существования устойчивой популяции межпланетной пыли в пространстве между орбитами планет и как один из источников данных о характерных размерах и распределении частиц межпланетной среды.

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020JE006509>

веществом. Именно это взаимодействие делает возможным рассмотрение кинетической аэродинамики аппарата в направленной дисперсной среде.

Ключевым отличием такой структуры от обычного пылевого облака является не только повышенная концентрация частиц, но и наличие заданной орбитальной и пространственной организации. Дисперсное вещество должно не просто присутствовать в выбранной области, а сохранять параметры, позволяющие использовать его как среду повторяемого движения. Поэтому такая структура должна оцениваться не только по плотности вещества, но и по степени фазового разброса частиц, устойчивости распределения, ожидаемой скорости деградации и способности к восстановлению эксплуатационных параметров.

Итоги главы.

В практическом смысле орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура может рассматриваться как искусственная инфраструктурная среда, формируемая в выбранной области космического пространства. Её назначение состоит не в том, чтобы заменить двигательную установку аппарата или исключить навигационное управление, а в том, чтобы создать воспроизводимые условия взаимодействия аппарата со средой.

Естественные пылевые структуры подтверждают физическую возможность существования протяжённых дисперсных образований в Солнечной системе, но не являются инфраструктурой движения. Их параметры возникают естественно и не согласованы с требованиями конкретного аппарата. Искусственная орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура отличается тем, что дисперсный состав, протяжённость и фазовая холодность движения частиц задаются как взаимосвязанные инженерные параметры. Только при одновременном контроле этих характеристик дисперсное вещество перестаёт быть локальной помехой или распределённым фактором риска и становится предсказуемой средой движения, в которой аппарат взаимодействует с потоком частиц на повторяемых и расчётно задаваемых условиях.

Дальнейшее рассмотрение требует введения критериев физического режима дисперсной среды, параметров кинетического взаимодействия частиц, геометрического согласования аппарата и оценки долговечности структуры как инфраструктурного объекта.

5. Физический режим орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры

После определения орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры как физического объекта необходимо перейти к описанию её рабочего режима. В предыдущей главе были выделены три базовых признака структуры: дисперсный состав, протяжённость и фазовая холодность. Однако сами по себе эти признаки ещё не позволяют определить, будет ли структура оставаться почти вакуумной областью, станет ли она воспроизводимой средой взаимодействия или перейдёт в режим чрезмерной столкновительности и деградации.

Для ответа на этот вопрос необходимо ввести набор физических параметров, через которые может быть описан режим существования дисперсной среды. Именно эти параметры задают границы между допустимыми и недопустимыми состояниями

структуры и позволяют перейти от качественного определения объекта к инженерно-физической постановке.

Физический режим орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры задаётся совокупностью параметров дисперсной среды, определяющих характер столкновительного взаимодействия, степень разреженности и устойчивость распределения вещества. Эти параметры позволяют различать несколько предельных состояний: почти вакуумную область с редкими независимыми столкновениями, переходную кинетическую среду с воспроизводимым воздействием на аппарат и чрезмерно плотную среду, в которой тепловые и эрозионные нагрузки становятся недопустимыми.

В настоящей работе физический режим структуры рассматривается на уровне базовой инженерно-физической постановки. Вводимые соотношения не задают окончательный расчёт конкретной структуры, аппарата или орбитальной зоны, а определяют критерии, необходимые для построения последующих количественных моделей. Главная задача данного раздела состоит в том, чтобы показать, какие параметры дисперсной среды должны задаваться проектно, а не оставаться случайными свойствами распределённого вещества.

При этом физический режим структуры не следует понимать как один неизменный режим для всей возможной инфраструктурной линии. Первый расчётный участок рассматривается как упрощённый почти однородный случай, предназначенный для проверки базового режима взаимодействия среды с аппаратом. В дальнейшем структура может задаваться не только как область с одним средним значением плотности, но и как система функциональных зон с различной концентрацией, фракционным составом, фазовой холодностью и допустимой эрозионной нагрузкой.

Первым параметром является **характерный размер частиц**. Обозначим его как d_p , где индекс p - particle (частица) относится к частице. В реальной структуре частицы не обязаны иметь один одинаковый размер; напротив, среда может задаваться некоторым допустимым диапазоном:

$$d_{p,min} \leq d_p \leq d_{p,max}$$

Количественно этот диапазон задаёт допустимую энергию единичного столкновения и верхний предел опасной фракции: чем больше $d_{p,max}$, тем выше требования к защите корпуса и тем уже допустимый диапазон относительных скоростей.

Этот диапазон имеет принципиальное значение. Если в среде сохраняются крупные неконтролируемые фракции, она остаётся источником риска для аппарата. Если же диапазон размеров задан инженерно и опасные фракции исключены, среда становится предсказуемой и допустимой. Поэтому для искусственной дисперсной структуры важен не только средний размер частиц, но и верхняя граница допустимого размера, определяющая предельную энергию локального столкновения.

В качестве широкого физического ориентира может рассматриваться диапазон порядка:

$$d_p \sim 1\text{--}100 \text{ микрометра (далее по тексту «мкм»)}$$

который соответствует наблюдаемым частицам межпланетной пылевой среды. Однако для искусственной структуры этот диапазон не следует понимать как окончательное проектное значение. Он задаёт область инженерного поиска и анализа чувствительности параметров среды. Практический сценарий должен

использовать более узкую целевую фракцию. В настоящей версии в качестве первого расчётного примера далее рассматривается диапазон порядка 50–70 мкм, тогда как при последующей оптимизации могут исследоваться и другие укрупнённые диапазоны, например 40–80 мкм или 40–90 мкм.

Такой порядок величин согласуется с регистрациями межпланетной пыли космическим аппаратом Juno и с лабораторными исследованиями межпланетных пылевых частиц, собранных в стратосфере Земли⁵

Для искусственной структуры данный диапазон не является окончательным проектным значением; он задаёт стартовую область инженерного поиска. В первом ограниченном сценарии рабочий диапазон должен дополнительно уточняться по материалу, морфологии, энергии единичного столкновения и допустимой эрозионной нагрузке.

Вторым параметром является **численная концентрация частиц**:

$$n = N / V$$

где N — число частиц в рассматриваемом объёме, а V — объём участка дисперсной структуры.

Количественно рост n увеличивает число взаимодействий на единицу объёма и усиливает воздействие среды на аппарат, но одновременно повышает риск взаимных столкновений частиц и ускоренной деградации структуры.

Концентрация определяет, насколько часто частицы взаимодействуют друг с другом и с аппаратом. При слишком малом n структура фактически остаётся почти вакуумной областью с редкими случайными столкновениями. При слишком большом n резко возрастают тепловые, эрозионные и столкновительные нагрузки, а также сложность поддержания структуры.

Третьим параметром является **эффективное сечение взаимодействия частиц**. В первом приближении его можно оценить через характерный размер частицы:

$$\sigma \sim (d_p)^2$$

Количественно увеличение характерного размера частицы ведёт к квадратичному росту эффективного сечения взаимодействия, поэтому размер частиц влияет на столкновительность среды сильнее, чем линейно.

В настоящей версии σ используется как эффективное кинетическое сечение, необходимое для оценки длины свободного пробега и частоты столкновений. В первом приближении оно может быть задано через геометрический размер частицы, однако в последующих моделях должно уточняться с учётом формы

⁵ Interplanetary Dust Particles Collected from the Stratosphere: Physical, Chemical, and Mineralogical Properties and Implications for Their Sources (Частицы межпланетной пыли, собранные в стратосфере: физические, химические и минералогические свойства и их значение для определения происхождения). Источник обобщает результаты лабораторных исследований межпланетных пылевых частиц размером от нескольких до сотни микрометров, собранных в стратосфере Земли. В работе рассматриваются размеры, плотность, пористость, химический состав, минералогия и вероятные источники межпланетной пыли. В настоящей работе источник используется как эмпирическая основа для оценки физических свойств реальных межпланетных частиц и как подтверждение существования устойчивой популяции частиц микронного и десятимикронного диапазона в межпланетной среде.

[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(94)90014-0)

частиц, распределения размеров, относительных скоростей, зарядового состояния и плазменной среды.

Следовательно, σ не следует понимать как полную физическую характеристику частицы. В рамках данной версии оно используется как расчётная величина, связывающая размерный диапазон частиц с вероятностью столкновительного взаимодействия. Для настоящей постановочной работы достаточно зафиксировать, что именно произведение концентрации и эффективного сечения задаёт первый критерий вероятности столкновительного взаимодействия на единице длины.

Средняя длина свободного пробега как базовый параметр структуры

После задания характерного размера частиц, концентрации и эффективного сечения взаимодействия естественным образом вводится средняя длина свободного пробега:

$$\lambda = 1 / (n * \sigma)$$

Здесь λ показывает среднее расстояние, которое частица проходит до столкновения с другой частицей в дисперсной среде.

Для настоящей работы этот параметр имеет фундаментальное значение. Именно длина свободного пробега связывает между собой размер частиц, концентрацию вещества и столкновительный режим среды. В дальнейшем через λ будут определяться число Кнудсена, частота взаимных столкновений, степень внутренней деградации структуры и границы допустимых режимов её существования.

Количественно увеличение концентрации или эффективного сечения взаимодействия уменьшает длину свободного пробега и переводит структуру от почти бесстолкновительного режима к более связанному столкновительному режиму. Напротив, увеличение длины свободного пробега уменьшает вероятность взаимных столкновений и повышает долговечность распределения.

Поэтому для рассматриваемой концепции λ следует рассматривать как один из базовых параметров проектирования структуры. Именно через него определяется, остаётся ли среда практически независимой совокупностью частиц или переходит в режим, где взаимные столкновения начинают существенно влиять на её распределение, эволюцию и способность сохранять заданные параметры.

После введения длины свободного пробега можно перейти к производным параметрам столкновительного режима. Важнейшим из них является частота взаимных столкновений частиц:

$$v_{\text{coll}} \sim n * \sigma * v_{\text{rel,p}}$$

где v_{coll} (collision) — частота взаимных столкновений частиц;

n — концентрация частиц;

σ — эффективное сечение взаимодействия;

$v_{\text{rel,p}}$ —(relative particle) относительная скорость частиц внутри самой дисперсной структуры.

Количественно частота взаимных столкновений растёт при увеличении концентрации, размера частиц и внутреннего разброса скоростей. Однако для рассматриваемой концепции решающее значение имеет именно последний фактор. При одинаковой концентрации вещества и одинаковом размерном составе среда с большим разбросом скоростей будет быстрее деградировать вследствие

взаимных столкновений частиц⁶, тогда как фазово-холодная структура способна сохранять заданные параметры значительно дольше. Поэтому долговечность структуры определяется не только количеством вещества, но и степенью согласованности орбитальных параметров и скоростей частиц. В этом смысле фазовая холодность является одним из ключевых условий существования протяжённой дисперсной структуры как устойчивого инфраструктурного объекта.

Поскольку:

$$\lambda = 1 / (n * \sigma)$$

частоту взаимных столкновений можно также записать в виде:

$$v_{coll} \sim v_{rel,p} / \lambda$$

Эта запись показывает, что долговечность структуры зависит не только от концентрации и сечения взаимодействия, но и от внутреннего разброса скоростей. При малом внутреннем разбросе скоростей $v_{rel,p}$ частота взаимных столкновений может оставаться низкой даже при ненулевой концентрации вещества. Это важно для долговечности структуры: среда должна быть достаточно плотной для взаимодействия с аппаратом, но достаточно упорядоченной по скоростям и орбитальным параметрам, чтобы взаимные столкновения частиц не приводили к быстрой деградации распределения.

В этом смысле структура должна быть холодной в фазовом смысле. Речь идёт не о температуре среды в обычном газодинамическом смысле, а о малом фазовом разбросе частиц внутри структуры: их орбитальные параметры и скорости должны быть достаточно согласованы, чтобы частицы не образовывали хаотически пересекающийся поток с высокой внутренней столкновительностью. Поэтому “холодность” в данной работе является не термодинамическим, а орбитально-кинетическим критерием.

Для рассматриваемой концепции особый интерес представляет не предельно разреженный и не плотный газоподобный режим, а промежуточная область параметров, в которой среда остаётся достаточно разреженной для долговременного существования, но при этом сохраняет способность оказывать воспроизводимое воздействие на проходящий аппарат.

При этом долговечность структуры определяется не только количеством вещества, но и характером движения самих частиц. Если частицы движутся хаотично и имеют большой разброс скоростей, взаимные столкновения происходят чаще, что ускоряет изменение распределения вещества и деградацию структуры. Если же частицы имеют близкие орбитальные параметры и малый разброс скоростей, частота взаимных столкновений уменьшается, а структура может сохранять рабочие свойства значительно дольше.

В этом смысле структура должна быть фазово-холодной. Речь идёт не о низкой температуре вещества, а о малом разбросе скоростей и орбитальных параметров

6 Origins and Dynamics of Interplanetary Dust Particles (Происхождение и динамика частиц межпланетной пыли). В настоящей работе источник используется как основа для анализа динамики дисперсных популяций, изменения размерного состава частиц, влияния столкновительных процессов на долговечность пылевых структур и оценки факторов, определяющих эволюцию протяжённых дисперсных образований в межпланетном пространстве.

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050167069/downloads/20050167069.pdf>

частиц внутри среды. Именно фазовая холодность является одним из ключевых условий долговечности протяжённой дисперсной структуры.

Следует различать геометрическую разреженность среды и её динамическую столкновительность. Число Кнудсена показывает отношение длины свободного пробега к характерному размеру, однако само по себе не раскрывает, насколько часто частицы фактически сталкиваются друг с другом в направленной структуре. Для этого необходимо учитывать не только концентрацию и эффективное сечение взаимодействия, но и относительную скорость частиц внутри самой среды.

Таким образом, для оценки работоспособности структуры недостаточно рассматривать только концентрацию вещества или только длину свободного пробега. Рабочий режим определяется одновременно вероятностью взаимодействия аппарата со средой, внутренней столкновительностью самих частиц и способностью структуры сохранять заданные параметры в течение длительного времени. Именно поэтому к рабочему режиму предъявляется несколько взаимосвязанных требований:

- среда не должна быть настолько разреженной, чтобы аппарат взаимодействовал лишь с отдельными случайными частицами и не получал воспроизводимого кинетического воздействия;
- среда не должна быть настолько плотной, чтобы движение аппарата переходило в режим разрушительного абразивного потока с недопустимой тепловой и эрозионной нагрузкой;
- среда не должна быть хаотичной по внутреннему движению частиц, поскольку высокий фазовый разброс даже при допустимой концентрации увеличивает внутреннюю столкновительность и ускоряет деградацию структуры.

Именно такой режим является предпочтительным для первого рассмотрения: он не исключает иных режимов, но задаёт требуемое сочетание воспроизводимого воздействия, допустимых нагрузок и потенциальной долговечности структуры.

Для упрощённой диагностики этого режима может использоваться число Кнудсена:

$$Kn = \lambda / L_c$$

где L_c (characteristic length) — характерный размер аппарата, относительно которого оценивается степень разреженности среды.

Число Кнудсена показывает отношение длины свободного пробега частиц к характерному размеру аппарата. Оно позволяет оценить, будет ли аппарат взаимодействовать преимущественно с отдельными частицами или с более плотной средой.

Однако для рассматриваемой концепции одного числа Кнудсена недостаточно. Оно характеризует разреженность среды, но не учитывает согласованность движения частиц. Поэтому одинаковое значение Kn может соответствовать как хаотическому пылевому облаку, так и фазово-холодной направленной структуре.

По этой причине число Кнудсена в настоящей работе используется как вспомогательный критерий и должно рассматриваться совместно с относительной скоростью частиц $v_{rel,p}$, частотой взаимных столкновений v_{coll} и фазовой холодностью структуры.

В настоящей работе число Кнудсена используется прежде всего для оценки режима взаимодействия дисперсной среды с аппаратом. Поэтому в качестве L_c принимается не произвольный масштаб структуры, а характерный размер аппарата

или его взаимодействующей части. В первом приближении таким размером может быть характерный поперечный размер корпуса D_a :

$$Kn_a = \lambda / D_a$$

где D_a (apparatus) — характерный поперечный размер аппарата, относительно которого оценивается степень разреженности среды.

То есть для оценки взаимодействия среды с аппаратом в качестве характерного размера используется поперечный размер аппарата D_a , где индекс a (apparatus) относится к аппарату. Однако число Кнудсена может использоваться не только для аппарата, но и для оценки самой структуры. В этом случае в качестве характерного размера принимается толщина рабочего слоя H_s где индекс s (structure) относится к структуре:

$$Kn_s = \lambda / H_s$$

где H_s (structure)— толщина слоя структуры.

Эти отношения характеризуют разные аспекты среды. В первом случае оценивается режим взаимодействия частиц с аппаратом: будет ли аппарат встречать отдельные частицы как редкие независимые объекты или взаимодействовать со статистически значимым потоком вещества. Во втором случае оценивается уже сама структура: достаточно ли велика её концентрация и толщина рабочего слоя для сохранения устойчивого распределения вещества и воспроизводимого воздействия на проходящие аппараты.

В качестве предварительного инженерного ориентира для взаимодействия аппарата со средой в настоящей версии принимается область:

$$Kn_a \sim 1-10$$

Этот диапазон соответствует переходу от режима, где длина свободного пробега соизмерима с характерным размером аппарата, к верхней границе переходного режима. В классической разреженной газовой динамике переходный режим обычно связывается с областью порядка

$$0,1 < Kn < 10,$$

а при $Kn \geq 10$ система переходит к свободномолекулярному режиму⁷.

В настоящей работе данный диапазон используется не как универсальное проектное требование для всех возможных орбитально-ориентированных протяжённых дисперсных структур, а как ориентир для первого расчётного сценария. Он должен уточняться при выборе конкретного аппарата, рабочей фракции, допустимой относительной скорости, защитно-стабилизирующей компоновки и области размещения структуры. Так при:

⁷ High-Altitude Aerodynamics of the Clipper Spacecraft (Аэродинамика космического аппарата Clipper на большой высоте) — исследование режимов взаимодействия космического аппарата с разреженной средой в диапазоне от свободномолекулярного до континуального течения. В настоящей работе используется как практический источник по применению числа Кнудсена к космическим аппаратам, определению границ свободномолекулярного, переходного и континуального режимов, а также как пример использования кинетических критериев для описания взаимодействия аппарата с крайне разреженной средой.

$$Kn_a \ll 1$$

среда становится слишком вязкой и может создавать избыточные тепловые и эрозионные нагрузки. При:

$$Kn_a \gg 10$$

среда становится слишком разреженной: аэродинамические свойства ослабевают, а взаимодействие с аппаратом сводится к редким независимым столкновениям.

Именно поэтому число Кнудсена в данной работе вводится не как формальная математическая деталь, а как показатель перехода от почти вакуумного режима к среде с воспроизводимым кинетическим воздействием. При слишком большом Kn структура приближается к режиму свободного полёта в почти вакуумном пространстве: взаимодействия редки, инфраструктурная функция среды слабо выражена, а её аэродинамические свойства практически теряются. В этом случае частицы действуют преимущественно как независимые микростолкновения, а не как среда, способная создавать воспроизводимое кинетическое воздействие на аппарат.

Следовательно, концентрация частиц в искусственной структуре должна подбираться не произвольно, а от целевого режима взаимодействия. Если в качестве характерного масштаба принят поперечный размер аппарата D_a , то при заданном Kn_a целевая концентрация может быть оценена как:

$$n_{\text{target}} \sim 1 / (\sigma * D_a * Kn_a)$$

n_{target} (target concentration) — целевая концентрация частиц в структуре, обеспечивающая заданное число Кнудсена для аппарата

Количественно это означает, что для более крупных частиц или большего эффективного сечения требуется меньшая концентрация для достижения того же Kn_a , тогда как уменьшение размера частиц требует увеличения их числа в единице объёма. При этом выбор концентрации не может определяться только требуемым режимом разреженности среды. Увеличение концентрации и размера частиц одновременно влияет на силовое воздействие на аппарат, тепловую нагрузку и потенциальную эрозионную цену прохождения. Поэтому рабочая концентрация должна рассматриваться совместно с требованиями безопасности и допустимого режима взаимодействия, которые будут рассмотрены в следующей главе.

Рабочая концентрация должна определяться совместно с размерным диапазоном частиц, допустимым режимом взаимодействия с аппаратом и требованиями безопасности. В первом расчётном рассмотрении целевой является промежуточная область: среда должна быть достаточно плотной, чтобы оказывать измеримое и воспроизводимое воздействие на аппарат, но достаточно разреженной и фазово упорядоченной, чтобы не превращаться в разрушительный абразивный поток и не деградировать за счёт внутренних столкновений.

Тем самым физический режим структуры задаётся обратным инженерным выбором. Исходным вопросом является не то, какое количество вещества возможно разместить в выбранной области, а то, какой диапазон размеров частиц, какая концентрация, какая длина свободного пробега и какой уровень внутреннего фазового разброса необходим для получения воспроизводимой, но допустимой кинетической среды.

Такая постановка переводит дисперсное вещество из категории неопределённого внешнего фактора в категорию проектируемого параметра инфраструктуры. В этом случае плотность, размерный состав, длина свободного пробега и фазовая

холодность рассматриваются не как случайные свойства среды, а как параметры, подбираемые под требуемый режим взаимодействия с аппаратом.

Таким образом, в рамках настоящей постановочной работы физический режим орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры задаётся не одной величиной, а системой взаимосвязанных параметров:

$$d_{p,min} \leq d_p \leq d_{p,max}$$

$$d_p \sim 1-100 \text{ мкм}$$

$$n = N / V$$

$$\sigma \sim (d_p)^2$$

$$\lambda = 1 / (n * \sigma)$$

$$V_{coll} \sim n * \sigma * v_{rel,p}$$

$$V_{coll} \sim v_{rel,p} / \lambda$$

$$Kn = \lambda / L_c$$

$$Kn_a = \lambda / D_a$$

$$Kn_s = \lambda / H_s$$

$$Kn_a \sim 1-10$$

$$n_{target} \sim 1 / (\sigma * D_a * Kn_a)$$

Эти соотношения не являются полным описанием существования дисперсной структуры, но задают минимальный расчётно-критериальный аппарат, необходимый для описания её физического режима. Они показывают, что структура определяется не только количеством внесённого вещества, но и размерным диапазоном частиц, концентрацией, эффективным сечением взаимодействия, длиной свободного пробега, частотой взаимных столкновений, внутренним фазовым разбросом и числом Кнудсена как диагностическим критерием.

Таким образом, физический режим орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры раскрывается не только через параметры самой среды, но и через её будущую способность взаимодействовать с аппаратом. Без такого взаимодействия структура оставалась бы только распределением вещества. Именно возможность расчётного взаимодействия с аппаратом превращает её в инфраструктурную среду движения: среда становится не фоном и не помехой, а заранее организованным участком, способным участвовать в стабилизации, направлении, демпфировании и ограничении допустимого коридора движения.

При этом орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура не должна пониматься как равномерный цилиндр одинаковой плотности, одинакового фракционного состава и одинакового назначения на всём протяжении. Описание через средние параметры необходимо для первого приближения, однако развитая инфраструктурная структура может включать несколько функциональных зон, различающихся концентрацией частиц, фракционным составом, поперечным профилем, фазовым разбросом, направлением относительного движения частиц и допустимой эрозионной нагрузкой.

Разные участки такой структуры могут проектироваться под разные режимы взаимодействия с аппаратом:

- Входная зона может выполнять функцию мягкого ввода аппарата в рабочий коридор и снижения ошибки входа;
- Основная направляющая зона может обеспечивать слабое распределённое воздействие, поддержание допустимого режима движения и повышение повторяемости прохождения;
- Коррекционная зона может иметь повышенную плотность или иную геометрию для исправления отклонений;
- Зона повышенного взаимодействия может использоваться там, где требуется более сильное изменение траектории или снижение относительной ошибки;
- Зона торможения. Отдельным вариантом может выступать диссипативная зона, предназначенная преимущественно для торможения аппарата или снижения относительной скорости. В такой зоне могут использоваться частицы с повышенной способностью к деформации, разрушению или поглощению энергии столкновения, что позволяет уменьшать эрозионную цену взаимодействия и переводить часть кинетической энергии в процессы внутренней диссипации. Подобные участки могут быть особенно полезны вблизи цели, на тормозно-входных этапах или в специальных корректирующих режимах;
- Ответвляющая зона может переводить часть аппаратов в иной траекторный коридор, например от общей внутренней линии к миссиям во внешнюю часть Солнечной системы.

Следовательно, различные участки структуры не обязаны иметь одинаковые физические характеристики и одинаковый режим взаимодействия с аппаратом. Напротив, они могут специально проектироваться под разные функции: ввод в рабочий коридор, направленное сопровождение, коррекцию отклонений, торможение, перераспределение потоков аппаратов или иные задачи. Такая неоднородность является не нарушением концепции, а её естественным свойством. Поэтому при дальнейшем рассмотрении важно различать локальный режим отдельного участка и общую архитектуру протяжённой инфраструктурной линии, которая может состоять из последовательности функционально различных зон.

Итоговое преимущество такой системы состоит в перераспределении требований между аппаратом и средой. В классической баллистической схеме точность, коррекция, стабилизация и значительная часть энергетической ответственности сосредоточены на самом аппарате и его двигательной системе. В настоящей работе часть этих функций переносится на заранее созданную инфраструктурную среду. Поэтому форма корпуса, защитные поверхности, допустимая относительная скорость, концентрация частиц, размерный состав, фазовая согласованность и направление движения среды образуют не только единую инженерную задачу, но и источник инфраструктурного выигрыша: движение становится более повторяемым, менее чувствительным к отдельным отклонениям и потенциально менее зависимым от постоянной активной коррекции.

Отдельно необходимо подчеркнуть отличие рабочей плотности искусственной структуры от плотности естественной пылевой среды. Зодиакальное облако и естественные пылевые полосы используются в настоящей работе как физический прецедент существования протяжённых дисперсных образований, но не как прямой аналог рабочей инфраструктурной среды. Их параметры возникают естественно и не предназначены для создания воспроизводимого кинетического воздействия на аппарат.

Поэтому рабочая плотность орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры заведомо должна быть выше фоновой плотности естественной межпланетной пыли в выбранном коридоре. Это не противоречие, а сама проектная функция структуры: она создаётся не для пассивного существования, а для формирования измеримого потока частиц через эффективную площадь аппарата. Такая концентрация допустима только при одновременном выполнении ограничений по размеру частиц, эрозии, нагреву, фазовой согласованности, векторному направлению и сроку службы.

Следовательно, естественные пылевые структуры подтверждают возможность существования протяжённых дисперсных распределений, но рабочая искусственная структура должна рассматриваться как локальное проектное повышение концентрации в ограниченном коридоре. Именно поэтому её плотность не должна выводиться из средней плотности зодиакального облака напрямую: она задаётся обратным инженерным расчётом от требуемого взаимодействия с аппаратом и затем проверяется по ограничениям долговечности и безопасности.

6. Кинетическая аэродинамика аппарата в направленной дисперсной среде

После определения физических параметров структуры необходимо рассмотреть второй элемент системы — аппарат, взаимодействующий с дисперсной средой.

В орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуре аппарат не может рассматриваться как произвольное тело, помещённое в облако вещества. Его корпус, характерный размер, ориентация, эффективная площадь взаимодействия, защитные поверхности, стабилизирующие элементы и допустимый диапазон относительных скоростей должны быть согласованы с параметрами самой структуры. В этом смысле проектируется не отдельно дисперсная среда и не отдельно аппарат, а связанная инженерная система: производственно-логистический узел, обеспечивающий получение, подготовку и поддержание параметров среды, сама дисперсная структура и аппарат заданного класса.

Аналогией такого подхода может служить переход от передвижения человека в естественной среде к использованию искусственно созданной инфраструктуры. На открытой местности человек вынужден самостоятельно учитывать ветер, осадки, температуру, особенности рельефа и другие факторы окружающей среды. Однако при создании дороги, здания или иного инфраструктурного объекта часть этих функций переносится на саму среду. Человек по-прежнему должен учитывать её особенности, но уже взаимодействует не с полностью хаотическими внешними условиями, а с заранее подготовленным пространством движения и деятельности.

Аналогично этому орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура не отменяет требований к аппарату, но переносит часть функций обеспечения движения с аппарата на специально подготовленную внешнюю среду. В результате проектируется не только аппарат, но и условия его движения.

Производственно-логистический узел в этой связке выполняет обслуживающую функцию: он обеспечивает получение и поддержание параметров среды — размерного диапазона частиц, концентрации, морфологии, степени фазовой согласованности, допустимого разброса скоростей и воспроизводимости подачи вещества. Дисперсная структура задаёт рабочий физический режим среды. Аппарат, в свою очередь, должен иметь такую форму, защиту, ориентацию и режим

прохождения, при которых взаимодействие со средой остаётся не случайным повреждающим фактором, а расчётным кинетико-аэродинамическим процессом.

Такая постановка отличается от обычной логики полёта в почти вакуумном пространстве. В вакууме форма аппарата часто определяется компоновкой, размещением оборудования, тепловым режимом, прочностью, стартовыми ограничениями, требованиями ориентации и задачами раскрытия внешних элементов. В направленной дисперсной среде форма аппарата становится одним из условий допустимого прохождения структуры: она определяет эффективную площадь столкновений, распределение импульсной нагрузки, характер теплового воздействия, возможную эрозию и допустимость стабилизирующего вклада со стороны потока частиц.

Одновременно эта постановка отличается и от движения в плотной атмосфере. Дисперсная структура не является сплошной газовой средой. В ней нет обычного атмосферного континуума, классического пограничного слоя и стандартной аэродинамики крыла в смысле уравнений Навье — Стокса. Поэтому уравнения Навье — Стокса не принимаются здесь как базовое описание движения аппарата. Они могут быть полезны лишь как дальняя аналогия для сплошных или квазисплошных режимов, но не описывают основной физический механизм рассматриваемой постановки.

Термин “кинетическая аэродинамика” в настоящей работе используется в специальном смысле. Он обозначает не классическую аэродинамику сплошной среды, а расчётное взаимодействие аппарата с направленным статистическим потоком отдельных частиц в разреженной дисперсной среде. В этом режиме важны не подъёмная сила в атмосферном смысле и не пограничный слой, а поток частиц на эффективную площадь аппарата, частота столкновений, импульсная передача, тепловая нагрузка, эрозионная цена и возможность стабилизирующего вклада при согласованной форме аппарата.

В настоящей работе кинетическая аэродинамика понимается как раздел описания движения аппарата в направленной разреженной дисперсной среде, в котором определяющую роль играют не свойства сплошного газа, а статистически воспроизводимое взаимодействие аппарата с потоком отдельных частиц. Предметом кинетической аэродинамики являются импульсная передача, тепловое воздействие, эрозионная нагрузка, стабилизирующий или демпфирующий эффект потока, а также требования к взаимному согласованию аппарата и среды. В отличие от классической аэродинамики, основанной на непрерывности среды и уравнениях сплошной механики, кинетическая аэродинамика рассматривает режим, в котором воздействие формируется совокупностью отдельных столкновений, но уже достаточно часто повторяется для возникновения воспроизводимого инженерного эффекта.

В рамках настоящей работы термин вводится как рабочее инженерно-физическое понятие для описания взаимодействия аппарата с орбитально-ориентированными протяжёнными дисперсными структурами.

Введённое определение задаёт только общий физический смысл кинетической аэродинамики. Для практического использования этого понятия необходимо определить диапазон режимов, в которых взаимодействие аппарата с направленной дисперсной средой остаётся воспроизводимым и пригодным для инженерного описания. Иными словами, требуется критерий, позволяющий различать режим редких случайных столкновений, режим статистически устойчивого потока частиц и режим чрезмерно плотного взаимодействия с ростом

тепловой и эрозионной нагрузки. В настоящей работе в качестве такого критерия используется число Кнудсена.

В предыдущей главе число Кнудсена было введено как вспомогательный критерий физического режима среды. Для взаимодействия структуры с аппаратом использовалась запись:

$$Kn_a = \lambda / D_a$$

где D_a — характерный поперечный размер аппарата. В настоящей главе этот параметр используется уже не для общего описания структуры, а для оценки того, как аппарат воспринимает направленную дисперсную среду: как редкие независимые столкновения, как воспроизводимый поток частиц или как чрезмерно плотную среду с повышенной тепловой и эрозионной нагрузкой.

Рабочим ориентиром первого расчётного сценария остаётся переходная область

$$Kn_a \sim 1-10$$

В этом диапазоне среда ещё не является сплошной, но взаимодействие частиц с аппаратом уже может рассматриваться как статистически повторяемый кинетический поток. При слишком большом Kn_a столкновения становятся редкими и слабо воспроизводимыми; при слишком малом Kn_a возрастает риск перехода к более плотному режиму с увеличением сопротивления, тепловой нагрузки и требований к защите.

Именно этот режим взаимного согласования аппарата и среды в настоящей работе обозначается как кинетическая аэродинамика аппарата в направленной дисперсной среде. Термин “аэродинамика” здесь используется не в смысле движения крыла в плотном газе, а в более широком инженерном смысле: как описание взаимодействия тела с окружающей средой движения. Поскольку среда состоит из частиц, а не из сплошного газа, такая аэродинамика является

Основными вопросами кинетической аэродинамики аппарата в направленной дисперсной среде являются:

- поток частиц на корпус;
- частота столкновений;
- импульсная нагрузка;
- интегральный импульс, передаваемый аппарату;
- изменение скорости аппарата;
- тепловой режим;
- требования к кинетико-аэродинамическому согласованию аппарата и среды.

Поток частиц на корпус

Первым параметром количественного описания взаимодействия является поток частиц на аппарат. Если аппарат движется относительно дисперсной среды со скоростью $v_{rel,a}$, а численная концентрация частиц равна n , то поток частиц через единичную площадь можно оценить как:

$$\Phi_p \sim n * v_{rel,a}$$

где Φ_p (particle)— поток частиц на единицу площади, n — численная концентрация частиц, $v_{rel,a}$ — относительная скорость аппарата и частиц дисперсной среды.

Эта величина показывает, сколько частиц пересекает единичную площадь за единицу времени. При малом Φ_p взаимодействие остаётся редким и слабо выраженным. При слишком большом Φ_p возрастает риск тепловой нагрузки, эрозии и разрушительного абразивного воздействия. Рабочая область должна находиться между этими крайностями: поток должен быть достаточным для воспроизводимого кинетического эффекта, но не должен превращать среду в разрушительный поток частиц.

Поток частиц связывает параметры среды с аппаратом. Одна и та же дисперсная структура будет по-разному воздействовать на аппараты разного размера, формы и ориентации. Поэтому поток на корпус является не только свойством среды, но и свойством выбранной схемы прохождения аппарата через эту среду.

Частота столкновений

Если эффективная площадь взаимодействия аппарата со средой равна A_{eff} , то частота столкновений частиц с аппаратом может быть оценена как:

$$v_a \sim n * v_{rel,a} * A_{eff}$$

где v_a — частота столкновений частиц с аппаратом, n — численная концентрация частиц, $v_{rel,a}$ — относительная скорость аппарата и частиц дисперсной среды, A_{eff} (effective area) — эффективная площадь аппарата, воспринимающая поток частиц.

Эта формула показывает, что аппарат с большей эффективной площадью получает больше столкновений при той же концентрации среды и той же относительной скорости. Поэтому форма корпуса, ориентация аппарата и наличие рабочих защитных поверхностей становятся не второстепенной конструктивной особенностью, а одним из условий работы всей системы.

При этом A_{eff} не обязательно совпадает с полной геометрической площадью аппарата. Она зависит от ориентации, формы, защитных элементов, выступающих частей, раскрываемых поверхностей и того, какие зоны аппарата реально воспринимают поток частиц. В дальнейшем именно A_{eff} становится одним из главных проектных параметров: увеличивая его, можно усилить взаимодействие со средой, но одновременно возрастает число столкновений и нагрузка на защитные поверхности.

Импульсная нагрузка

Следующим параметром является импульс, передаваемый аппарату при взаимодействии с частицами. Для частицы массы m_p , движущейся относительно аппарата со скоростью $v_{rel,a}$, характерный импульс единичного столкновения можно оценить как:

$$p_p \sim m_p * v_{rel,a}$$

где p_p (particle impulse) - характерный импульс единичного столкновения частицы с аппаратом, m_p (particle mass) - масса частицы.

Если поток создаёт многократно повторяющиеся столкновения частиц с аппаратом, то характерная сила воздействия может быть оценена как отношение суммарного передаваемого импульса ко времени взаимодействия:

$$F_{dust} \sim v_a * m_p * v_{rel,a}$$

Подставляя ранее полученное выражение для v_a получаем:

$$F_{\text{dust}} \sim n * A_{\text{eff}} * m_p * (v_{\text{rel},a})^2$$

Так как массовая плотность дисперсной среды может быть записана как:

$$\rho_{\text{dust}} = n * m_p$$

то формула принимает более удобный вид:

$$F_{\text{dust}} \sim C_{\text{eff}} * \rho_{\text{dust}} * A_{\text{eff}} * (v_{\text{rel},a})^2$$

где:

- F_{dust} (dust force) — характерная сила воздействия дисперсной среды на аппарат. индекс dust относится к дисперсной среде (рабочей пылевой фракции структуры);
- v_a (apparatus collision frequency) — частота столкновений частиц среды с аппаратом;
- m_p (particle mass) — масса частицы;
- $v_{\text{rel},a}$ (relative velocity) — относительная скорость частиц относительно аппарата;
- n — концентрация частиц;
- A_{eff} (effective area) — эффективная площадь взаимодействия аппарата со средой;
- ρ_{dust} (dust density) — массовая плотность дисперсной среды;
- C_{eff} (effective coefficient) — эффективный коэффициент передачи импульса.

Коэффициент C_{eff} учитывает, что частицы могут отражаться, разрушаться, дробиться, частично прилипать, передавать импульс под углом или взаимодействовать с защитной поверхностью неидеально. Для порядковой оценки можно принимать:

$$C_{\text{eff}} \sim 1$$

Эта формула показывает квадратичную зависимость силы воздействия от относительной скорости. Поэтому скорость аппарата в дисперсной структуре не может задаваться произвольно. Даже при малых частицах и умеренной концентрации увеличение относительной скорости резко повышает импульсную нагрузку.

Для аппарата это задаёт первое условие допустимости:

$$F_{\text{dust}} \leq F_{\text{allow}}$$

где F_{allow} — допустимая механическая нагрузка на аппарат или на его рабочий защитный элемент в данном режиме движения.

Если аппарат использует двигательную установку малой тяги, например электрореактивный, ионный или плазменный двигатель, возникает дополнительное условие:

$$F_{\text{thrust}} > F_{\text{dust}}$$

где F_{thrust} — тяга аппарата, F_{dust} — суммарная сила воздействия дисперсной среды.

Это условие означает, что воздействие дисперсной среды не должно превышать возможности аппарата по его компенсации или использованию. Следовательно, параметры среды и параметры аппарата должны рассматриваться совместно, а допустимый режим взаимодействия определяется не только свойствами структуры, но и характеристиками самого аппарата.

При этом данное условие не связано с тем, ускоряет или тормозит структура аппарат. Речь идёт не о направлении воздействия, а о его величине. Одна и та же структура может создавать различный эффект для аппаратов разных классов. Среда, допустимая для более массивного или высокотягового аппарата, может оказаться чрезмерной для аппарата с меньшей тягой, меньшей массой или более жёсткими ограничениями по нагрузкам. Поэтому выбор параметров структуры и выбор класса аппарата являются взаимосвязанной задачей: изменение одного из этих элементов требует пересмотра другого.

Для ориентировочного расчётного режима можно принять:

$$\rho_{\text{dust}} = 10^{-13} - 10^{-12} \text{ кг/м}^3$$

$$v_{\text{rel,a}} = 10\,000 \text{ м/с}$$

$$A_{\text{eff}} = 10 - 100 \text{ м}^2$$

Данный диапазон соответствует концентрациям, при которых для рассматриваемых размеров частиц и характерных размеров аппарата сохраняется переходный режим взаимодействия порядка $Kn_a \sim 1 - 10$. При меньших плотностях взаимодействие быстро приближается к режиму редких независимых столкновений, а при больших плотностях возрастает вероятность перехода к режимам с повышенной тепловой и эрозионной нагрузкой.

Тогда сила воздействия имеет порядок:

$$F_{\text{dust}} \sim 10^{-4} - 10^{-2} \text{ Н}$$

Это небольшая сила в абсолютном выражении. Однако в протяжённой структуре она действует не мгновенно, а на протяжении всего времени прохождения рабочего участка. Поэтому для оценки полезного эффекта необходимо перейти от силы к полному переданному импульсу.

Интегральный импульс и изменение скорости аппарата

Если длина участка равна L , то время прохождения аппарата через участок можно оценить как:

$$T_{\text{pass}} = L / v_{\text{rel,a}}$$

где:

- T_{pass} (passage time) — время прохождения аппарата через участок структуры;
- L — длина рассматриваемого участка структуры;
- $v_{\text{rel,a}}$ (relative velocity) — относительная скорость частиц относительно аппарата.

Полный переданный импульс:

$$J_{\text{dust}} = F_{\text{dust}} * T_{\text{pass}}$$

где:

- J_{dust} (dust impulse) — полный импульс, переданный аппарату дисперсной средой за время прохождения участка;
- F_{dust} (dust force) — суммарная сила воздействия дисперсной среды на аппарат.

Таким образом, полный переданный импульс определяется не только силой воздействия среды, но и временем нахождения аппарата внутри структуры. Подставляя выражение для F_{dust} , получаем:

$$J_{\text{dust}} \sim C_{\text{eff}} * \rho_{\text{dust}} * A_{\text{eff}} * v_{\text{rel},a} * L$$

где:

- C_{eff} (effective coefficient) — коэффициент передачи импульса;
- ρ_{dust} (dust density) — массовая плотность дисперсной среды;
- A_{eff} (effective area) — эффективная площадь взаимодействия аппарата со средой.

Эта формула показывает, что даже слабая сила может дать измеримый результат, если действует на достаточно большой длине. Поэтому для протяжённой дисперсной структуры главным является не только мгновенная сила, но и интегральный импульс, переданный аппарату за весь проход.

Эта формула показывает, что даже сравнительно слабое воздействие среды может давать измеримый результат при достаточной длине участка взаимодействия. Поэтому для протяжённой дисперсной структуры важна не только мгновенная сила воздействия, но и полный импульс, переданный аппарату за всё время прохождения участка.

Изменение скорости аппарата может быть оценено как:

$$\Delta v_{\text{dust}} = J_{\text{dust}} / M_{\text{app}}$$

где:

- Δv_{dust} (dust velocity increment) — изменение скорости аппарата, полученное за счёт прохождения дисперсной структуры;
- J_{dust} (dust impulse) — полный импульс, переданный аппарату дисперсной средой;
- M_{app} (apparatus mass) — масса аппарата.

С учётом ранее полученных выражений для силы воздействия и полного импульса получаем:

$$\Delta v_{\text{dust}} \sim (C_{\text{eff}} * \rho_{\text{dust}} * A_{\text{eff}} * v_{\text{rel},a} * L) / M_{\text{app}}$$

где:

- C_{eff} (effective coefficient) — коэффициент передачи импульса;
- ρ_{dust} (dust density) — массовая плотность дисперсной среды;
- A_{eff} (effective area) — эффективная площадь взаимодействия аппарата со средой;
- $v_{\text{rel},a}$ (relative velocity) — относительная скорость частиц относительно аппарата;
- L — длина рабочего участка структуры.

Полученное выражение показывает, что прямой импульсный вклад структуры определяется совместно параметрами среды, длиной участка, относительной скоростью, площадью взаимодействия и массой аппарата. При этом Δv_{dust} следует рассматривать как прямой кинетический эффект структуры, а не как исчерпывающую оценку её полезности.

Численный пример для первого расчётного сценария приведён в практической части работы в главе 25, подраздел «Оценка прямого импульсного вклада Δv_{dust} для первого расчётного сценария».

Однако кинетическая аэродинамика аппарата определяется не только передаваемым импульсом. Не менее важным является тепловой режим взаимодействия аппарата с потоком частиц, поскольку часть кинетической энергии столкновений неизбежно переходит в нагрев поверхности, деформацию частиц и другие процессы диссипации энергии.

Тепловой режим

Тепловая нагрузка на аппарат связана с кинетической энергией частиц. Для одной частицы энергия столкновения оценивается как:

$$E_p \sim (1/2) * m_p * (v_{\text{rel},a})^2$$

E_p (particle energy) — характерная энергия столкновения одной частицы с аппаратом;

m_p (particle mass) — масса частицы.

При потоке частиц на эффективную площадь аппарата характерная мощность кинетического воздействия может быть записана как:

$$P_{\text{dust}} \sim v_a * E_p$$

P_{dust} (dust power) — мощность кинетического воздействия дисперсной среды на аппарат;

v_a (apparatus collision frequency) — частота столкновений частиц среды с аппаратом.

С учётом выражения для v_a (подраздел «Частота столкновений» настоящей главы):

$$P_{\text{dust}} \sim (1/2) * n * A_{\text{eff}} * m_p * (v_{\text{rel},a})^3$$

Используя соотношение $P_{\text{dust}} = n * m_p$, выражение можно записать через массовую плотность среды:

$$P_{\text{dust}} \sim 0,5 * C_{\text{heat}} * \rho_{\text{dust}} * A_{\text{eff}} * (v_{\text{rel},a})^3$$

где:

- C_{heat} (heat coefficient) — эффективный коэффициент перехода кинетической энергии частиц в тепловую нагрузку на рабочую поверхность аппарата;
- ρ_{dust} (dust density) — массовая плотность дисперсной среды;
- A_{eff} (effective area) — эффективная площадь взаимодействия аппарата со средой.

Полученное выражение показывает, что тепловая нагрузка определяется не только плотностью среды и площадью взаимодействия, но и относительной скоростью аппарата. Особенно важно, что тепловая нагрузка зависит от относительной скорости в третьей степени. Поэтому скорость становится одним из наиболее чувствительных параметров режима прохождения структуры.

Численные оценки тепловой нагрузки для первого расчётного сценария приведены в практической части работы совместно с оценкой прямого импульсного вклада Δv_{dust} , поскольку обе величины определяются одним и тем же набором параметров среды и аппарата.

Кубическая зависимость возникает вследствие того, что поток столкновений пропорционален $v_{\text{rel},a}$, а энергия каждой отдельной частицы пропорциональна $(v_{\text{rel},a})^2$. Поэтому даже умеренное увеличение относительной скорости способно значительно увеличить тепловую нагрузку на аппарат.

Следовательно, при выборе рабочего режима структуры необходимо учитывать не только прямой импульсный эффект, но и допустимый тепловой режим взаимодействия аппарата с дисперсной средой.

Диссипативный контакт как возможный способ снижения эрозионной цены

Помимо взаимодействия твёрдых частиц с защитной поверхностью аппарата, для отдельных тормозных или демпфирующих участков может рассматриваться диссипативный режим контакта: использование диссипативной мягкой фракции либо специально подобранной контактной пары “частица — защитная поверхность”. В таком режиме задача состоит не в длительном налипании вещества на аппарат, а в том, чтобы часть кинетической энергии столкновения расходовалась на деформацию, разрушение, внутренний нагрев или скольжение частицы при минимальном повреждении защитного слоя.

Такой подход может быть особенно важен для участков, где полезная функция среды связана не с максимальной передачей импульса, а с мягким торможением, демпфированием или снижением локальной эрозионной цены. Аппарат в этом случае должен иметь низкоадгезионное, скользящее или специально текстурированное покрытие, уменьшающее длительное налипание вещества и неконтролируемый рост массы. Сама дисперсная фракция при этом должна быть рассчитана не только по размеру и плотности, но и по деформационным, прочностным и адгезионным свойствам.

В простейшем виде долю энергии, уходящую в деформационно-диссипативный канал, можно записать как:

$$E_{\text{diss}} = \chi_{\text{diss}} * (1/2) * m_p * (v_{\text{rel,a}})^2,$$

где:

- E_{diss} (dissipated energy) — энергия, поглощённая деформацией, разрушением, внутренним нагревом или скольжением частицы;
- χ_{diss} (dissipation coefficient) — эффективный коэффициент диссипации;
- m_p (particle mass) — масса частицы;
- $v_{\text{rel,a}}$ (relative velocity) — относительная скорость частиц относительно аппарата.

При $\chi_{\text{diss}} > 0$ взаимодействие приближается к режиму твёрдого ударного контакта, при котором большая часть энергии идёт в локальную ударную нагрузку, нагрев поверхности и эрозионное повреждение. При росте χ_{diss} увеличивается доля энергии, поглощаемая самой частицей или контактной парой, что потенциально снижает эрозионную цену прохождения.

В настоящей работе этот режим не рассматривается как базовое свойство всей структуры. Он вводится только как возможное направление оптимизации отдельных тормозных или демпфирующих сегментов. Его практическая применимость требует отдельного материаловедческого анализа: выбора состава частиц, их морфологии, допустимого диапазона относительных скоростей, стойкости покрытий, адгезии, деградации материалов в космической среде и поведения контактной пары при многократных микростолкновениях.

Итоги главы

Таким образом, кинетическая аэродинамика аппарата в направленной дисперсной среде является центральным элементом настоящей постановочной работы. Без неё орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура оставалась бы только протяжённым распределением вещества в космическом пространстве. Инфраструктурный смысл такой структуры возникает не из самого факта наличия

частиц, а из расчётного взаимодействия аппарата с заранее подготовленной средой. Именно это взаимодействие позволяет рассматривать дисперсную структуру не как помеху, не как естественное пылевое облако и не как пассивный фон, а как искусственный участок движения с заданным физическим режимом.

Главное отличие рассматриваемой постановки состоит в том, что проектируется не отдельно структура и не отдельно аппарат. Проектируется связанная система: производственно-логистический узел — дисперсная структура — аппарат заданного класса. Производственно-логистический узел обеспечивает получение, подготовку и поддержание требуемой фракции, концентрации, морфологии и фазовой согласованности частиц. Дисперсная структура задаёт рабочий физический режим среды. Аппарат, в свою очередь, должен иметь форму, защитные поверхности, эффективную площадь взаимодействия, ориентацию и допустимый диапазон скоростей, согласованные с этим режимом. Только в такой связке поток частиц может рассматриваться не как случайный повреждающий фактор, а как расчётный кинетико-аэродинамический процесс.

Кинетическая аэродинамика в данном смысле занимает промежуточное положение между вакуумной баллистикой и классической аэродинамикой атмосферы. Аппарат движется не в пустоте, где форма корпуса почти не участвует во взаимодействии со средой, и не в плотной атмосфере, где применима логика сплошного потока, пограничного слоя и континуальной аэродинамики. Он проходит через искусственно подготовленную разреженную дисперсную среду, в которой отдельные частицы создают повторяемое, измеримое и проектно задаваемое воздействие. Поэтому форма аппарата, его защитные элементы и эффективная площадь взаимодействия становятся не второстепенными конструктивными признаками, а частью физического режима прохождения структуры.

В этой главе были введены основные параметры такого взаимодействия: поток частиц Φ_p , частота столкновений ν_a , сила воздействия F_{dust} , интегральный импульс J_{dust} , изменение скорости Δv_{dust} и тепловая мощность P_{dust} . Эти величины показывают, что взаимодействие аппарата с направленной дисперсной средой может быть описано не только качественно, но и расчётно. Полученные соотношения показывают, что взаимодействие аппарата с направленной дисперсной средой может создавать измеримый импульсный эффект, величина которого определяется параметрами среды и аппарата. Этот импульс недостаточен для замены двигателя и не должен трактоваться как самостоятельный разгонный механизм, однако он достаточен для рассмотрения направляющего, коррекционного и стабилизирующего вклада в выбранном режиме прохождения.

Принципиально важно, что полезное действие структуры не существует отдельно от цены взаимодействия. Тот же поток частиц, который передаёт аппарату импульс, одновременно создаёт тепловую нагрузку, эрозионный износ, требования к защитной поверхности и ограничения по допустимой относительной скорости. Поэтому кинетическая аэродинамика в настоящей работе не является утверждением о бесплатном внешнем воздействии. Она задаёт связанный режим, в котором импульсная передача, стабилизация, демпфирование, нагрев, эрозия и навигационная цена должны рассматриваться совместно.

Смысл такого воздействия не следует сводить к прямому разгону аппарата. Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура не подменяет двигательную установку, баллистическую навигацию, гравитационные манёвры или активное управление. Её назначение состоит в другом: создать внешний инфраструктурный режим, в котором часть требований к точности входа, малым

коррекциям, стабилизации, демпфированию и повторяемости прохождения переносится с одиночного аппарата на заранее подготовленную среду. В этом отношении структура выступает не как двигатель, а как обслуживаемый участок движения, меняющий условия прохождения выбранного орбитального коридора.

Отсюда следует основной вывод главы: кинетическая аэродинамика делает орбитально-ориентированную протяжённую дисперсную структуру физически осмысленной как инфраструктурный объект. Если взаимодействие со средой слишком редко, структура остаётся почти пустой областью с отдельными микростолкновениями. Если оно слишком интенсивно, структура превращается в недопустимый эрозионный и тепловой поток. Рабочим является промежуточный режим, в котором воздействие достаточно воспроизводимо для расчётного использования, но остаётся ограниченным по силовой, тепловой и эрозионной цене.

Именно поэтому дальнейшее развитие работы должно рассматривать не отдельно среду и не отдельно аппарат, а их совместную эксплуатационную систему. Следующий вопрос состоит уже не только в том, может ли направленная дисперсная среда передать аппарату импульс, а в том, какова цена этого взаимодействия: какая масса вещества фактически встречается аппаратом, какой эрозионный износ возникает, как должна быть устроена защитная компоновка, какой тепловой режим допустим и как полученная коррекция продолжает влиять на движение после выхода из дисперсного участка. Эти вопросы образуют переход от кинетической аэродинамики к оценке полезного действия, эрозионной цены и защитной компоновки аппарата.

7. Полезное действие, эрозионная цена и защитная компоновка аппарата

В предыдущей главе было показано, что направленная дисперсная среда способна передавать аппарату импульс, создавать тепловую нагрузку и формировать кинетико-аэродинамический режим прохождения. Однако само наличие взаимодействия ещё не означает его полезности. Любое воздействие среды на аппарат имеет двойственный характер: наряду с передачей импульса возникают нагрев, эрозия поверхности, требования к защите и ограничения на допустимый режим движения.

Поэтому эффективность орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры должна оцениваться не только через передаваемый импульс, но и через цену его получения. В рамках настоящей работы такая цена рассматривается прежде всего как эрозионная и конструкционная нагрузка, возникающая при прохождении аппарата через дисперсную среду.

При этом полезное действие структуры не сводится к непосредственному изменению скорости аппарата. Даже сравнительно слабое распределённое воздействие может использоваться для повышения повторяемости прохождения, снижения коррекционной цены, демпфирования отклонений, стабилизации движения и последующего баллистического накопления результата после выхода из рабочего участка.

Следовательно, оценка структуры требует одновременного рассмотрения двух взаимосвязанных аспектов:

- полезного кинетического воздействия на аппарат;

- цены этого воздействия в виде эрозии, тепловой нагрузки и требований к защитной компоновке.

Именно поэтому аппарат в рамках данной концепции рассматривается не как пассивный объект, движущийся через среду, а как элемент единой инженерной системы, для которой параметры структуры и параметры аппарата должны выбираться совместно.

Эрозия как цена передачи импульса

Любая передача импульса между дисперсной средой и аппаратом сопровождается взаимодействием частиц с поверхностью аппарата. Поэтому получение полезного кинетического эффекта неизбежно связано с определённой эрозионной ценой.

Для оценки этой цены прежде всего важно определить не глубину повреждения материала, а количество вещества, с которым взаимодействует аппарат на протяжении рабочего участка. В первом приближении суммарная масса вещества, пересекающая единицу площади аппарата на участке длиной L , может быть записана как:

$$m_A = \rho_{\text{dust}} * L$$

где:

- m_A (areal mass) — масса вещества, прошедшая через единицу площади аппарата;
- ρ_{dust} (dust density) — массовая плотность дисперсной среды;
- L — длина рабочего участка структуры.

Это выражение показывает, что интегральное воздействие определяется не только плотностью среды, но и длиной участка взаимодействия. Даже сравнительно разреженная среда способна передать заметный суммарный импульс, если воздействие продолжается на достаточно большом протяжении траектории.

Вместе с тем сама по себе величина m_A ещё не определяет степень повреждения поверхности. Реальная эрозия зависит от материала аппарата, формы частиц, угла столкновения, относительной скорости и характера контакта.

Поэтому в рамках настоящей постановочной работы величина m_A рассматривается как базовый показатель эрозионной цены. Она характеризует интегральное количество вещества, взаимодействующего с единицей площади аппарата, и может использоваться для последующей оценки защитных требований и допустимого режима прохождения структуры.

Переход от массы взаимодействующего вещества к конкретной глубине эрозии требует отдельного материаловедческого расчёта и зависит от выбранных материалов аппарата, характеристик частиц и режима столкновения. По этой причине детальная оценка эрозии выходит за рамки настоящей постановочной работы.

Таким образом, эрозия рассматривается не как абсолютное ограничение на применение структуры, а как один из проектных параметров, который должен учитываться совместно с полезным кинетическим эффектом.

Влияние скорости на плотность среды и эрозионную цену

На первый взгляд может показаться, что увеличение относительной скорости аппарата неизбежно должно приводить к росту эрозии и ухудшению условий прохождения структуры. Действительно, энергия отдельного столкновения возрастает пропорционально квадрату относительной скорости, а тепловая нагрузка в первом приближении возрастает ещё быстрее. Однако для

искусственной дисперсной структуры скорость не является независимым параметром.

В рамках рассматриваемой концепции параметры среды могут подбираться совместно с параметрами движения аппарата. Поэтому увеличение относительной скорости не обязательно означает сохранение прежней плотности среды. Напротив, более высокая скорость может сопровождаться уменьшением концентрации частиц, увеличением длины свободного пробега и переходом к более разреженному режиму взаимодействия.

Иными словами, при проектировании структуры изменяется не только скорость прохождения, но и сама среда. Поэтому сравнение различных режимов движения должно выполняться не при фиксированной плотности среды, а при совместном изменении параметров структуры и аппарата.

В простейшем виде эрозионная цена может рассматриваться как функция нескольких взаимосвязанных параметров:

$$h_{\text{erosion}} = f(\rho_{\text{dust}}, d_p, v_{\text{rel},a}, L, M_s)$$

где:

- h_{erosion} (erosion depth) — глубина эрозии или степень повреждения поверхности;
- f (functional dependence) — функциональная зависимость, показывающая, что эрозия определяется совокупным влиянием нескольких параметров;
- ρ_{dust} (dust density) — массовая плотность дисперсной среды;
- d_p (particle diameter) — характерный размер частицы;
- $v_{\text{rel},a}$ (relative velocity) — относительная скорость частиц относительно аппарата;
- L — длина рабочего участка структуры;
- M_s (surface material) — материал защитного слоя или внешней поверхности аппарата.

Здесь функция f не задаётся в явном виде, поскольку реальная эрозия определяется сложным сочетанием свойств частиц, режима столкновения и характеристик материала поверхности. Данное выражение используется только для качественного указания факторов, влияющих на эрозионную цену прохождения структуры.

Это означает, что одинаковая величина эрозии может быть получена различными комбинациями скорости, плотности среды и размерного диапазона частиц.

Следовательно, увеличение скорости не обязательно приводит к пропорциональному увеличению эрозионной цены. В ряде случаев часть роста энергетики столкновения может компенсироваться уменьшением концентрации вещества, изменением размерного состава частиц или использованием иной защитной компоновки аппарата.

Для орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры это особенно важно, поскольку различные участки могут проектироваться под различные режимы движения. Медленные режимы могут использовать более плотную среду и более длительное взаимодействие. Более быстрые режимы могут использовать меньшую плотность вещества при сохранении полезного кинетического эффекта за счёт увеличенной относительной скорости.

Таким образом, скорость в рассматриваемой концепции является не только источником нагрузки, но и одним из параметров оптимизации структуры. Допустимый режим прохождения определяется не отдельной величиной скорости или плотности среды, а их совместным выбором.

Связь эрозии с производственно-логистическим узлом

Параметры эрозии определяются не только условиями движения аппарата, но и свойствами самих частиц, формируемых производственно-логистическим узлом. В рамках настоящей работы под производственно-логистическим узлом понимается совокупность средств получения, подготовки, сортировки, хранения и подачи вещества в структуру.

Именно на этом уровне могут задаваться характеристики будущей среды: размерный диапазон частиц, распределение размеров, форма частиц, материал, степень пористости и другие параметры, влияющие на последующее взаимодействие с аппаратом.

Поэтому эрозионная цена структуры определяется не только условиями её эксплуатации, но и параметрами её производства. Изменяя характеристики частиц ещё на этапе формирования среды, можно существенно влиять на режим взаимодействия с аппаратом.

Например, частицы одинаковой массы могут иметь различную морфологию. Компактные твёрдые частицы способны создавать более выраженное локальное воздействие на поверхность. Частицы сложной формы, пористые частицы или частицы, склонные к разрушению при столкновении, могут перераспределять часть энергии взаимодействия на внутренние процессы деформации и разрушения.

Следовательно, производственно-логистический узел в рассматриваемой концепции выполняет не только функцию снабжения структуры веществом. Он становится одним из инструментов управления режимом взаимодействия среды с аппаратом.

Это означает, что параметры частиц должны рассматриваться как проектируемые характеристики инфраструктуры наряду с плотностью среды, длиной участка и режимом движения аппарата. Следовательно, эрозионная цена структуры определяется не только условиями прохождения, но и решениями, принимаемыми ещё на этапе формирования среды.

Далее логично переходить к подразделу «Защитная компоновка аппарата», где уже вводятся защитно-стабилизирующий модуль, вынос защитных элементов вперёд и разделение полезных и чувствительных элементов аппарата.

Защитная компоновка аппарата

Поскольку взаимодействие с дисперсной средой сопровождается передачей импульса, нагревом и эрозией, аппарат должен рассматриваться как объект, изначально приспособленный к прохождению структуры. Это не означает создания принципиально нового класса космических аппаратов, однако требует согласования конструкции аппарата с параметрами среды.

Наиболее чувствительными элементами аппарата обычно являются оптические приборы, радиаторы, элементы энергосистемы, раскрываемые конструкции, кабельные трассы и внешние поверхности приборных отсеков. Поэтому непосредственное воздействие дисперсной среды на такие элементы желательно ограничивать.

Одним из возможных решений является разделение функций аппарата между рабочими и защитными элементами конструкции. В этом случае основное взаимодействие со средой принимает на себя специально выделенный защитный модуль или группа поверхностей, рассчитанных на длительное воздействие частиц.

Такой подход позволяет локализовать основную эрозионную нагрузку на ограниченной части аппарата и уменьшить воздействие на чувствительное оборудование. В результате цена прохождения структуры определяется не повреждением всего аппарата, а ресурсом отдельных защитных элементов.

В простейшем случае защитная компоновка может включать:

- передние защитные поверхности;
- выносные экраны;
- многослойные защитные панели;
- сменные или обслуживаемые защитные элементы;
- специальные кинетико-аэродинамические поверхности взаимодействия со средой.

Конкретный вариант определяется параметрами структуры, скоростью движения и допустимым ресурсом аппарата.

Функции защитно-стабилизирующего модуля

В рамках настоящей концепции элементы, взаимодействующие с дисперсной средой, не должны рассматриваться исключительно как средства защиты. При соответствующей компоновке они способны одновременно участвовать в формировании режима движения аппарата, распределении импульсной нагрузки, стабилизации ориентации, ограничении эрозии и обеспечении воспроизводимого прохождения структуры.

По этой причине далее используется более широкий термин: защитно-стабилизирующий модуль.

Под данным термином понимается совокупность конструктивных элементов аппарата, предназначенных для контролируемого взаимодействия с дисперсной средой. В зависимости от задач миссии такой модуль может включать защитные экраны, выносные поверхности взаимодействия, стабилизирующие элементы, специальные кинетико-аэродинамические поверхности и другие конструкции, принимающие основное воздействие среды.

Такой модуль может выполнять сразу несколько функций:

- принимать основную эрозионную нагрузку;
- перераспределять импульсные воздействия;
- снижать чувствительность аппарата к отдельным столкновениям;
- участвовать в стабилизации ориентации;
- формировать требуемую эффективную площадь взаимодействия со средой;
- снижать чувствительность прохождения к отдельным отклонениям и повышать воспроизводимость режима движения.

Таким образом, защитно-стабилизирующий модуль является не только элементом защиты, но и частью кинетико-аэродинамической схемы аппарата, определяющей его взаимодействие с дисперсной средой.

Это принципиально отличается от традиционной космической техники, где защита обычно рассматривается как пассивный элемент конструкции. В рассматриваемой концепции взаимодействие со средой является частью рабочего режима движения, поэтому защитный элемент может одновременно участвовать в формировании полезного эффекта.

Стабилизирующий момент

Если центр приложения суммарного воздействия среды не совпадает с центром масс аппарата, возникает вращающий момент.

В первом приближении его можно оценить как:

$$M_{\text{stab}} \sim F_{\text{dust}} * l_{\text{eff}}$$

где:

- M_{stab} (stabilizing moment) — характерный стабилизирующий момент;
- F_{dust} (dust force) — сила воздействия дисперсной среды;
- l_{eff} (effective lever arm) — эффективное расстояние от центра масс аппарата до линии действия суммарной силы дисперсного потока.

Величина l_{eff} отражает вклад компоновки аппарата в стабилизирующее действие среды: положение центра масс, форму защитно-стабилизирующего модуля и расположение поверхностей, принимающих основной поток частиц. Поэтому l_{eff} является не свойством среды самой по себе, а параметром согласования аппарата с направленной дисперсной структурой. Для реального аппарата её определение требует отдельного расчёта распределения нагрузок по взаимодействующим поверхностям и выходит за рамки настоящей постановочной работы.

Сам факт возникновения момента ещё не определяет его полезность. В зависимости от компоновки аппарата он может как стабилизировать движение, так и создавать дополнительные требования к системе управления. Поэтому важно оценивать не только величину M_{stab} , но и то, насколько она сопоставима с возможностями штатной системы ориентации аппарата.

Для сравнительной оценки стабилизирующего вклада среды может использоваться относительный показатель:

$$\eta_{\text{stab}} = M_{\text{stab}} / M_{\text{ctrl},0}$$

где:

- η_{stab} (stabilization efficiency) — коэффициент стабилизирующего воздействия среды;
- $M_{\text{ctrl},0}$ (control moment) — характерный управляющий момент, необходимый аппарату в отсутствие стабилизирующего влияния дисперсной среды, где индекс 0 указывает на базовый режим движения аппарата без учёта стабилизирующего воздействия структуры.

Параметр η_{stab} не имеет собственной размерности, поскольку он является отношением двух моментов силы. При этом он не является самостоятельной физической константой. Напротив, η_{stab} следует рассматривать как сводный показатель, в котором отражается совместное влияние параметров среды, компоновки аппарата и режима прохождения структуры. Его задача состоит не в описании отдельного физического процесса, а в сравнительной оценке стабилизирующего вклада дисперсной среды относительно возможностей штатной системы ориентации аппарата.

Следовательно, влияние дисперсной среды на ориентацию аппарата может оцениваться не только качественно, но и через сравнение возникающего стабилизирующего момента с возможностями системы управления. При этом среда не рассматривается как самостоятельная замена системы ориентации. Её воздействие следует интерпретировать как дополнительный вклад, величина которого определяется совместно параметрами среды, компоновкой аппарата и режимом прохождения структуры.

Формы полезного действия дисперсной структуры

Прямое изменение скорости аппарата является лишь одной из возможных форм полезного действия структуры.

В инфраструктурной постановке интерес представляет не только величина непосредственно переданного импульса, но и изменение условий движения на всём последующем участке траектории.

Поэтому полезное действие структуры может проявляться в нескольких формах одновременно:

- прямое изменение скорости аппарата (ускорение, торможение или изменение отдельных составляющих скорости в зависимости от режима взаимодействия со средой);
- снижение потребности в коррекционных манёврах;
- уменьшение требований к точности отдельных коррекций за счёт повышения воспроизводимости режима прохождения структуры;
- демпфирование отклонений;
- расширение допустимого окна входа;
- стабилизация движения;
- создание условий для последующего баллистического накопления результата.

Особенно важно, что часть этих эффектов может сохраняться после выхода аппарата из структуры. В этом случае прямое воздействие заканчивается, однако изменённые параметры движения продолжают влиять на дальнейшую траекторию.

Именно поэтому полезность структуры не должна оцениваться только через мгновенную силу воздействия или только через прямой импульсный вклад. В ряде случаев последующее развитие траектории может оказаться важнее самого воздействия внутри структуры.

Баллистическое накопление результата после выхода из участка

После выхода аппарата из рабочего участка структуры непосредственное взаимодействие со средой прекращается. Однако результаты этого взаимодействия продолжают существовать в виде изменённых параметров движения.

Если структура создала небольшое изменение скорости, скорректировала направление движения или уменьшила поперечное отклонение аппарата, то эти изменения могут накапливаться по мере дальнейшего движения по траектории.

Для поперечного отклонения характерная оценка может быть записана как:

$$\Delta x_{\text{perp}} \sim \Delta v_{\text{perp}} * t_{\text{after}}$$

где:

- Δx_{perp} (transverse displacement) — поперечное смещение аппарата;
- Δv_{perp} (transverse velocity change) — изменение поперечной составляющей скорости;
- t_{after} (time after exit) — время после выхода из структуры.

При этом сам механизм накопления не требует дальнейшего воздействия среды и реализуется уже за счёт последующего баллистического движения аппарата.

Эта зависимость показывает, что даже небольшое изменение скорости способно приводить к заметному изменению положения аппарата при достаточно большом времени дальнейшего движения.

Поэтому структура может использоваться не только как источник непосредственного воздействия, но и как средство формирования более благоприятных начальных условий для последующего участка траектории.

Именно этот эффект в настоящей работе обозначается как баллистическое накопление результата. Он является одной из причин, по которым полезность структуры не может оцениваться только величиной прямого импульсного вклада или только локальными параметрами взаимодействия внутри рабочего участка.

Итоги главы

Проведённое рассмотрение показывает, что полезность орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры не сводится к непосредственному изменению скорости аппарата. Передаваемый импульс является лишь одной из форм воздействия среды. Не менее важными могут быть снижение коррекционной цены движения, повышение повторяемости прохождения, демпфирование отклонений, стабилизация ориентации и последующее баллистическое накопление результата после выхода из рабочего участка.

Одновременно любое полезное воздействие связано с определённой эрозионной и конструкционной ценой. Поэтому эффективность структуры должна оцениваться не через отдельный параметр, а через соотношение между получаемым эффектом и затратами ресурса аппарата.

В рамках настоящей работы эрозия рассматривается не как абсолютное ограничение на применение структуры, а как проектный параметр, который может регулироваться выбором плотности среды, размерного диапазона частиц, режима движения аппарата и характеристик защитно-стабилизирующего модуля.

Особое значение имеет возможность совместного проектирования аппарата и среды. В этом случае объектом проектирования становятся не только характеристики аппарата, но и сами условия его движения. В этом случае защитные элементы могут выполнять не только функцию экрана, но и участвовать в формировании требуемого режима взаимодействия со структурой. Такой подход позволяет рассматривать дисперсную среду не как внешний фактор риска, а как часть управляемой инженерной системы.

Следовательно, практическая реализуемость структуры определяется не только возможностью создания требуемой дисперсной среды, но и возможностью согласования её параметров с характеристиками аппарата и задачами конкретной миссии.

В следующей главе рассматривается вопрос формирования и поддержания самой дисперсной среды, а также требования к её пространственной организации и долговечности.

8. Условия формирования орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры

После введения физического режима структуры, кинетико-аэродинамического взаимодействия с аппаратом, эрозионной цены и защитной компоновки возникает

следующий инженерный вопрос: при каких условиях орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура может быть сформирована как управляемая среда движения.

В настоящей главе формирование структуры рассматривается как инженерная последовательность операций, а не как абстрактное внесение вещества в пространство. Речь идёт о создании рабочего профиля, параметры которого позволяют структуре взаимодействовать с аппаратом в допустимом кинетическом, тепловом, эрозионном и фазовом режиме.

К таким параметрам относятся:

- дисперсный состав;
- размерный диапазон частиц;
- концентрация;
- морфология частиц;
- фазовый разброс;
- фазовая холодность структуры;
- длина свободного пробега;
- режим кинетического взаимодействия;
- способность поддерживать распределение в заданном рабочем диапазоне.

Особое значение имеет различие между исходным и рабочим размерным диапазоном частиц. Диапазон порядка 1–100 мкм, упоминаемый при рассмотрении естественной межпланетной пыли, следует понимать как широкий исходный ориентир, показывающий существование микронной и десяткамикронной фракции в Солнечной системе. Для первого рабочего участка основным диапазоном рассматриваются преимущественно частицы порядка 10–100 мкм.

Частицы порядка 1 мкм и меньше не должны составлять основу структуры, поскольку сильнее подвержены радиационному давлению, эффекту Пойнтинга — Робертсона, зарядовым и плазменным процессам, а также быстрее теряют орбитальную и фазовую согласованность. Поэтому мелкая фракция может присутствовать как побочная или нерабочая компонента, но должна учитываться отдельно.

Рабочий размерный диапазон сам по себе не полностью определяет поведение частиц в структуре. Для практических задач формирования наиболее важным является соответствие частиц выбранному диапазону и степень однородности фракции. Чем меньше разброс по размеру, форме и массе, тем ближе баллистические характеристики частиц и тем устойчивее сохраняется согласованное распределение вещества.

Следовательно, при формировании структуры целесообразно стремиться к узкому размерному диапазону и высокой морфологической однородности рабочей фракции. Отклонение от этих условий не делает структуру невозможной, однако требует дополнительного учёта различий в поведении частиц. Частицы одинакового размера, но различной плотности, формы или внутренней структуры могут по-разному реагировать на внешние возмущения, что ускоряет рост фазового разброса и снижает срок сохранения рабочего профиля.

Следовательно, при формировании структуры целесообразно стремиться не просто к рабочему диапазону размеров, а к максимально однородной фракции с заранее заданными параметрами. Диапазон порядка 10–100 мкм следует рассматривать как инженерную область, внутри которой структура способна сохранять работоспособность. Однако для первого расчётного сценария

предпочтительным является существенно более узкий диапазон вокруг выбранного номинального размера частицы.

В качестве такого ориентира в настоящей работе рассматриваются частицы порядка 50 мкм с высокой морфологической однородностью и предсказуемыми свойствами материала. Подобный подход позволяет уменьшить различия в баллистическом поведении частиц, снизить влияние радиационного давления, зарядово-плазменных процессов и других механизмов деградации, а также увеличить срок сохранения рабочего профиля.

Таким образом, широкий диапазон размеров определяет область допустимого существования структуры, тогда как узкая и однородная фракция представляет собой целевое состояние, к которому следует стремиться при её формировании.

Принципиальный механизм формирования не требует создания среды «из ничего». Вещество может быть доставлено в выбранную область или получено локально, подготовлено до рабочей фракции и дозированно высвобождено вдоль заранее рассчитанного участка движения. Сам пролёт аппарата-носителя или серии аппаратов-носителей по выбранной траектории задаёт первичное распределение вещества в уже существующей орбитальной динамике.

Структура считается сформированной не тогда, когда вещество просто внесено в выбранную область, а тогда, когда создан рабочий профиль с заданными параметрами. Такой профиль должен иметь допустимую плотность, размерный и морфологический состав, фазовую и векторную согласованность, а также режим взаимодействия с аппаратом, при котором силовая, тепловая, эрозионная и навигационная цена прохождения остаются в допустимом диапазоне.

Следовательно, формирование структуры не сводится к простой операции распыления. Разовый выброс вещества может создать облако, шлейф или временную область повышенной концентрации частиц, но ещё не создаёт инфраструктурную среду. Для появления орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры необходимо, чтобы внесённое вещество приобрело согласованный режим движения, допустимый фракционный состав и воспроизводимый физический профиль.

В самом общем виде можно выделить три уровня формирования структуры.

Первый уровень — физическое внесение вещества. Он включает доставку или локальное получение материала, подготовку рабочей фракции, исключение опасных включений и накопление вещества в форме, пригодной для дозированного высвобождения.

Второй уровень — кинематическое задание среды. На этом уровне вещество высвобождается с требуемым направлением, скоростью, допустимым разбросом параметров и согласованием с выбранной орбитальной областью. Именно здесь формируется первичный рабочий профиль структуры.

Третий уровень — эксплуатационное доведение профиля. Он включает диагностику распределения, выявление зон недонасыщения или перенасыщения, корректирующие проходы, локальное переформирование профиля и поддержание параметров среды в рабочем диапазоне. Этот уровень особенно важен, поскольку даже правильно сформированная структура не является неизменной и должна рассматриваться как обслуживаемый объект.

Условия формирования такой структуры должны оцениваться не по критериям одиночного аппарата и не только по числу пусков с Земли, а по способности всей системы создать и поддерживать рабочий профиль. В этом смысле ключевыми

становятся не только масса вещества, но и точность подготовки фракции, воспроизводимость подачи, ширина выпускной зоны, согласованность скоростей, диагностируемость среды, возможность корректирующих проходов и срок сохранения эксплуатационных параметров.

В отличие от одноразовой миссионной логики, орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура должна оцениваться как инфраструктурный объект. Её формирование имеет смысл в том случае, если созданный участок может использоваться не один раз, а сохранять рабочую функцию после серии проходов аппаратов или восстанавливаться обслуживанием. Поэтому критерием формирования является не только успешное внесение вещества, но и появление повторяемого режима взаимодействия со средой.

Производственно-логистический узел в этой логике выступает не внешним дополнением, а функциональным условием формирования структуры. Он должен обеспечивать получение, подготовку, фракционирование, накопление, упаковку, доставку, дозированное высвобождение, измерение и коррекцию вещества. В настоящей главе этот узел рассматривается только на уровне необходимой функции. Его подробный состав, операционный цикл и расчётные критерии рассматриваются далее, во второй и третьей частях работы.

Следовательно, формирование орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры является не одной операцией, а последовательностью связанных действий: подготовка вещества, задание рабочей фракции, доставка или локальное получение материала, дозированное высвобождение, формирование первичного профиля, диагностика, коррекция и последующее обслуживание.

В практической части работы эти условия используются уже не как абстрактные требования, а как основа первого расчётного сценария формирования и применения структуры. Поэтому настоящая глава выполняет связующую функцию: она переводит ранее введённые физические параметры в набор инженерных условий, без которых структура не может рассматриваться как рабочая инфраструктурная среда.

Следующим вопросом становится долговечность созданного рабочего профиля. Даже если структура сформирована в допустимом режиме, она не является неизменной: её параметры могут уходить из рабочего диапазона под действием внутренних столкновений, фазового разброса, радиационного давления, эффекта Пойнтинга — Робертсона, гравитационных возмущений, зарядово-плазменных процессов и самих проходов аппаратов. Поэтому следующая глава рассматривает деградацию как потерю эксплуатационных параметров структуры.

9. Деградация как потеря эксплуатационных параметров

После рассмотрения условий формирования орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры следующим этапом является оценка времени сохранения её рабочего профиля. Для этого необходимо определить, что именно считается деградацией структуры и какие процессы приводят к потере её эксплуатационных параметров.

Деградацией орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры в настоящей работе считается выход параметров рабочего профиля за пределы допустимого эксплуатационного диапазона. Поэтому деградация понимается не как

аварийное разрушение структуры и не как простое исчезновение вещества, а как постепенная потеря режима, при котором структура способна выполнять инфраструктурную функцию.

Структура сохраняет свою функцию только до тех пор, пока её основные параметры остаются в рабочих пределах. К ним относятся размерный состав частиц, концентрация вещества, длина свободного пробега, фазовая и векторная согласованность движения частиц, а также режим кинетического взаимодействия с аппаратом.

Иными словами, структура сохраняет инфраструктурную функцию только до тех пор, пока её параметры остаются в диапазонах, заданных ранее:

$$d_{p,min} \leq d_p \leq d_{p,max}$$

n находится в допустимой области,

$$\lambda = 1 / (n \cdot \sigma)$$

обеспечивает рабочий режим среды, а число Кнудсена для взаимодействия с аппаратом

$$Kn_a = \lambda / D_a$$

остаётся в выбранном переходном диапазоне, ориентировочно:

$$Kn_a \sim 1-10$$

Выход любого из этих параметров за пределы допустимого режима означает деградацию структуры даже в том случае, если значительная часть вещества физически продолжает находиться в выбранной области.

При отсутствии внешних и внутренних возмущений такая структура не должна мгновенно терять заданный режим: параметры распределения сохранялись бы в рамках орбитальной динамики выбранной области. Поэтому долговечность определяется скоростью накопления возмущений, действующих на частицы и на их согласованное распределение.

К внешним факторам деградации относятся:

1. Солнечно-радиационные факторы: нагрев, радиационное давление, эффект Пойнтинга — Робертсона;
2. гравитационные факторы: возмущения со стороны массивных тел, резонансные области, дифференциальная прецессия и орбитальное рассогласование частиц;
3. плазменные и зарядовые процессы;
4. микрометеороидная и пылевая среда;
5. редкие солнечные события, включая вспышки и корональные выбросы массы.

К внутренним факторам деградации относятся:

1. взаимные столкновения частиц;
2. рост фазового разброса;
3. рост поперечного разброса скоростей частиц;
4. изменение размерного состава;
5. локальные нарушения концентрации;
6. эксплуатационные возмущения при прохождении аппаратов через структуру.

В простейшем виде характерное время деградации структуры может быть задано как отношение эффективной массы рабочего вещества к скорости его потерь:

$$\tau_{deg} \sim M_{str} / \dot{M}_{loss}$$

где:

- τ_{deg} (degradation time) — характерное время деградации структуры;
- M_{str} (structure mass) — эффективная масса вещества, участвующего в формировании и поддержании рабочего профиля структуры;
- $\dot{M}_{loss}$ (mass loss rate) — суммарная скорость потерь вещества или скорость ухода параметров среды из допустимого эксплуатационного диапазона.

τ_{deg} задаёт характерный временной масштаб, на котором структура начинает заметно терять свои рабочие свойства вследствие действия механизмов деградации.

Эта запись не описывает все механизмы деградации, но фиксирует основной инженерный смысл: долговечность структуры определяется не только тем, сколько вещества было внесено в выбранную область, но и тем, как быстро это вещество перестаёт соответствовать рабочим условиям.

Однако одной массовой оценки недостаточно. Для дисперсной структуры особенно важна деградация не всей массы сразу, а рабочего профиля. Даже если большая часть вещества остаётся в выбранной области, структура может терять свои эксплуатационные свойства вследствие роста поперечного разброса скоростей, нарушения векторной согласованности, изменения концентрации в активном коридоре или изменения размерного состава частиц.

Поэтому деградацию целесообразно описывать не только через скорость потери массы $\dot{M}_{loss}$, но и через изменение ключевых параметров рабочего профиля:

$$d_p(t)$$

$$n(t)$$

$$\lambda(t)$$

$$Kn_a(t)$$

$$\sigma_{perp}(t)$$

$$\theta_{vec}(t)$$

где:

$d_p(t)$ — текущий характерный размер частиц;

$n(t)$ — текущая концентрация частиц;

$\lambda(t)$ — текущая длина свободного пробега;

$Kn_a(t)$ — число Кнудсена для взаимодействия среды с аппаратом;

$\sigma_{perp}(t)$ — поперечный разброс скоростей частиц;

$\theta_{vec}(t)$ — параметр векторного рассогласования движения частиц относительно заданного направления.

В этом смысле деградация структуры означает не только уменьшение массы, но и ухудшение её качества как направленной среды движения.

Внешние факторы деградации структуры

Солнечное излучение, радиационное давление и Пойнтинг — Робертсон

Особое место среди внешних механизмов занимает солнечное излучение. Оно действует на частицы не только как источник нагрева, но и как динамический фактор. Для малых частиц в Солнечной системе необходимо учитывать радиационное давление и эффект Пойнтинга-Робертсона. Радиационное давление изменяет эффективное притяжение Солнца, а эффект Пойнтинга-Робертсона приводит к постепенной потере орбитального момента и медленному смещению частиц внутрь Солнечной системы⁸. Поэтому размерный состав рабочей фракции не может выбираться только по условиям взаимодействия с аппаратом; он должен также обеспечивать достаточную орбитальную долговечность частиц. В этом смысле рабочая фракция должна выбираться как компромисс между кинетико-аэродинамической полезностью и орбитальной долговечностью.

Для оценки влияния радиационного давления используется безразмерный параметр β , равный отношению силы радиационного давления к силе солнечной гравитации:

$$\beta = 0,57 * Q_{pr} / (\rho_{mat} * S_{\mu m})$$

где:

- β — отношение силы радиационного давления к силе солнечного гравитационного притяжения для данной частицы;
- Q_{pr} (radiation pressure efficiency factor) — коэффициент эффективности взаимодействия частицы с солнечным излучением; в первом приближении для порядковых оценок может приниматься порядка единицы;
- ρ_{mat} (material density) — плотность материала частицы в г/см³;
- $S_{\mu m}$ (particle radius in micrometers) — радиус частицы, выраженный в микрометрах.

Из этой зависимости следует, что чем меньше частица, тем сильнее для неё относительное влияние солнечного излучения. Частицы субмикронного и около микронного диапазона оказываются наиболее чувствительными к радиационному давлению, Пойнтинг-Робертсоновскому торможению, зарядовым и плазменным эффектам. Для частиц порядка 10–100 мкм эти эффекты не исчезают, но становятся менее разрушительными на горизонте первых лет и десятилетий эксплуатации.

Для характерного времени Пойнтинга — Робертсона можно использовать оценку:

$$T_{PR} \sim 400 * (a_{AU})^2 / \beta$$

где:

- T_{PR} (Poynting–Robertson timescale) — характерное время Пойнтинг–Робертсоновского смещения частицы;
- a_{AU} (orbital semimajor axis) — большая полуось орбиты частицы, выраженная в астрономических единицах;
- β — отношение силы радиационного давления к силе солнечного гравитационного притяжения.

Величина T_{PR} задаёт характерный временной масштаб, на котором эффект Пойнтинга — Робертсона начинает заметно изменять орбиту частицы вследствие постепенной потери её орбитальной энергии.

⁸ Burns J. A., Lamy P. L., Soter S. Radiation forces on small particles in the Solar System. Icarus, 1979. Используется для радиационного давления, параметра β и эффекта Пойнтинга-Робертсона как механизмов динамики малых частиц в Солнечной системе.
[doi:10.1016/0019-1035\(79\)90050-2](https://doi.org/10.1016/0019-1035(79)90050-2)

Эта оценка не является точным расчётом конкретной частицы, поскольку реальное время зависит от состава, формы, вращения, оптических свойств, эксцентриситета орбиты и взаимодействия с плазменной средой. Но она позволяет понять порядок влияния эффекта Пойнтинга — Робертсона на разные размерные диапазоны.

Ниже приводится не расчёт конкретного эксплуатационного сценария, а ориентировочная оценка порядка величин, позволяющая сопоставить влияние радиационного давления и эффекта Пойнтинга — Робертсона для разных размерных диапазонов частиц. Цель этой оценки состоит не в определении точного срока службы структуры, а в проверке того, насколько выбор рабочей фракции согласуется с требованиями орбитальной долговечности.

Для силикатно-металлической или минеральной фракции с $\rho_{\text{mat}} \sim 3 \text{ г/см}^3$ и $Q_{\text{pr}} \sim 1$ получаем:

для частицы радиусом $S_{\mu\text{m}} = 1 \text{ мкм}$:

$$\beta \sim 0,19$$

для частицы радиусом $S_{\mu\text{m}} = 10 \text{ мкм}$:

$$\beta \sim 0,019$$

для частицы радиусом $S_{\mu\text{m}} = 50 \text{ мкм}$:

$$\beta \sim 0,0038$$

Если структура размещается во внутренней части главного пояса астероидов, например в области порядка $a_{\text{AU}} \sim 2,4$, то:

$$T_{\text{PR}} \sim 400 * 2,4^2 / \beta$$

$$T_{\text{PR}} \sim 2300 / \beta$$

Тогда ориентировочно:

для $S_{\mu\text{m}} = 1 \text{ мкм}$:

$$T_{\text{PR}} \sim 12 \text{ 000 лет}$$

для $S_{\mu\text{m}} = 10 \text{ мкм}$:

$$T_{\text{PR}} \sim 120 \text{ 000 лет}$$

для $S_{\mu\text{m}} = 50 \text{ мкм}$:

$$T_{\text{PR}} \sim 600 \text{ 000 лет}$$

Эти величины показывают важный результат. Эффект Пойнтинга-Робертсона обязательно должен учитываться как механизм долгосрочной орбитальной деградации, но для рабочей фракции порядка 10–100 мкм он не является главным ограничителем первого эксплуатационного горизонта в 1–30 лет. На таком горизонте важнее поперечный разброс скоростей, качество фазовой и векторной согласованности, проходы аппаратов, локальные возмущения, зарядовое состояние и способность производственно-логистического узла корректировать профиль структуры.

Иначе обстоит дело с более мелкой фракцией. Частицы порядка 1 мкм и особенно субмикронные частицы должны рассматриваться как нежелательная основа рабочего диапазона. Они сильнее подвержены радиационному давлению, быстрее теряют орбитальную согласованность и могут вносить непредсказуемый вклад в зарядовые и плазменные процессы. Поэтому в рабочей структуре такая фракция

должна либо отбраковываться, либо учитываться как побочная нерабочая компонента.

Из этого следует важное ограничение для всей настоящей постановки: базовый размерный диапазон частиц первого рабочего участка должен быть смещён к более крупной фракции, например порядка 10–100 мкм, при обязательном контроле верхней границы по эрозионной и тепловой нагрузке на аппарат. Нижняя граница определяется не только слабостью взаимодействия с аппаратом, но и радиационной долговечностью. Верхняя граница определяется безопасностью прохождения аппарата через среду.

Для рабочего диапазона порядка 10–100 мкм радиационное давление и эффект Пойнтинга — Робертсона следует рассматривать как факторы долгосрочной деградации, но не как основной ограничитель первого эксплуатационного горизонта. На горизонте лет и первых десятилетий большее значение могут иметь фазовое рассогласование, поперечное распыливание, прохождения аппаратов и другие механизмы потери рабочего профиля.

Таким образом, Пойнтинг-Робертсоновское торможение не отменяет возможность существования структуры, но задаёт важное условие её проектирования: рабочая фракция не должна уходить в слишком мелкий размерный диапазон. Для первого участка основное обслуживание будет определяться не полным спиральным уходом частиц к Солнцу, а потерей рабочего профиля, снижением концентрации в активном коридоре, ростом поперечного разброса и нарушением согласованности. Но на более длинных горизонтах, при проектировании долговечных участков на десятилетия и более, радиационное давление и Пойнтинг — Робертсон должны входить в расчёт деградации как обязательные механизмы.

Гравитационные возмущения и орбитальное рассогласование

Отдельно следует учитывать гравитационные возмущения и дифференциальную прецессию. Даже если структура располагается в относительно спокойной области, частицы всё равно находятся в поле Солнца, планет и малых тел. Главный пояс астероидов содержит резонансные области, в которых орбитальная устойчивость может снижаться. Поэтому долговечная структура не должна размещаться произвольно: участок должен выбираться вне выраженных резонансных зон, вдали от крупных возмущающих тел и с учётом локальной динамики.

Для направленной структуры особенно опасна не только потеря отдельной частицы, но и постепенное рассогласование орбитальных элементов. Даже небольшие различия больших полуосей, эксцентриситетов, наклонов, аргументов перицентра и долгот узлов приводят к тому, что частицы со временем расходятся по фазе. Это можно обозначить как дифференциальную прецессию и фазовое растяжение структуры. В результате структура может физически сохранять вещество, но терять исходную векторную и пространственную организацию⁹.

В общем виде это ограничение можно записать через время орбитального рассогласования:

⁹ Gustafson B.A.S. Physics of Zodiacal Dust // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1994. Vol. 22. P. 553–595. Используется как источник по орбитальной эволюции межпланетной пыли и механизмам постепенного расхождения орбитальных параметров частиц, приводящим к изменению пространственной структуры пылевых образований.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ea.22.050194.003005>

$$T_{\text{orb_disp}} \sim 1 / \Delta\omega$$

где:

- $T_{\text{orb_disp}}$ (orbital dispersion time) — характерное время орбитального рассогласования структуры;
- $\Delta\omega$ (differential precession rate) — различие скоростей прецессии орбит или фазового ухода частиц внутри рабочего распределения.

Величина $T_{\text{orb_disp}}$ показывает характерный временной масштаб, на котором накопленное орбитальное рассогласование начинает заметно нарушать согласованность рабочего профиля структуры.

Эта формула не задаёт точный расчёт прецессии для конкретного участка, но фиксирует обязательный критерий. Чем больше разброс орбитальных элементов у частиц, тем выше $\Delta\omega$ и тем быстрее структура теряет согласованность. Поэтому при формировании участка необходимо ограничивать не только размер и концентрацию частиц, но и диапазон их орбитальных параметров. Фазовая согласованность в данной постановке означает именно это: частицы должны не просто находиться рядом, а сохранять близкие орбитальные элементы и допустимый разброс скоростей.

Важно подчеркнуть, что этот критерий не является второстепенной поправкой. Для протяжённой направленной структуры потеря фазовой и орбитальной согласованности может быть столь же существенной, как и физическая потеря вещества. Структура может сохранять значительную часть массы, но перестать быть рабочей средой, если частицы расходятся по орбитальным элементам, теряют общий вектор движения или выходят из допустимого фазового коридора.

Поэтому для последующей проверки необходимо оценивать не только массу вещества и скорость его потерь, но и время сохранения рабочего орбитального профиля. В общем виде условие можно записать так:

$$T_{\text{orb_disp}} \geq T_{\text{service}}$$

где:

- T_{service} (service interval) — требуемый срок сохранения рабочего профиля между циклами диагностики, коррекции и пополнения структуры.

Если $T_{\text{orb_disp}}$ меньше требуемого эксплуатационного интервала, выбранная область размещения не может считаться пригодной для долговременного участка без частого обслуживания. В таком случае необходимо либо выбирать другую орбитальную область, либо уменьшать допустимый срок между циклами восстановления, либо рассматривать структуру как короткоживущий рабочий участок, требующий регулярной коррекции.

Для практического сценария это означает, что зона размещения должна выбираться так, чтобы снизить дифференциальную прецессию и внешние гравитационные возмущения. Именно поэтому в дальнейшем рассматривается внутренняя часть главного пояса астероидов, но не произвольная точка внутри него: конкретный участок должен выбираться вне выраженных резонансных областей, включая зоны, связанные со щелями Кирквуда, и вдали от крупных возмущающих тел¹⁰. Иначе деградация будет определяться не только внутренним

¹⁰ Murray C.D., Dermott S.F. Solar System Dynamics. Cambridge University Press, 1999. Используется как источник по долговременной орбитальной эволюции, секулярным и

расплыванием профиля, но и нарастающим орбитальным рассогласованием частиц.

Для области главного пояса астероидов это означает, что выбор зоны порядка 2,3–2,5 а.е. не может основываться только на удобстве доступа к веществу или на удалённости от Земли. Такая зона должна быть дополнительно проверена по орбитальной устойчивости, положению относительно выраженных резонансов, величине дифференциальной прецессии, поперечному растяжению рабочего профиля и скорости накопления фазового разброса. В настоящей версии эта область рассматривается как предварительный кандидат для первого рабочего сценария, а не как окончательно доказанная оптимальная зона размещения.

Следовательно, численная оценка $\Delta\omega$ для конкретной области должна стать одним из первых этапов последующей орбитальной проверки. Она не отменяет настоящую постановку, но определяет, какой именно срок обслуживания и какая частота коррекции потребуются для выбранного участка.

Прочие внешние факторы деградации

Помимо радиационных и гравитационных механизмов, на структуру могут воздействовать и другие внешние факторы. К ним относятся плазменные и зарядовые процессы, потоки микрометеороидов, локальные пылевые возмущения, а также редкие солнечные события, включая вспышки и корональные выбросы массы.

Для большинства рабочих сценариев на горизонте лет и десятилетий данные процессы обычно не являются главным ограничивающим фактором. Однако они способны вносить дополнительный вклад в изменение скоростей частиц, нарушение фазовой согласованности, перераспределение вещества и изменение размерного состава фракции.

Наиболее значимыми из перечисленных процессов для выбранного диапазона размеров являются зарядовые и плазменные эффекты. Частицы могут приобретать электрический заряд под действием солнечного ультрафиолета, плазменной среды и взаимодействия с проходящими аппаратами. Зарядовое состояние влияет на их движение в межпланетном магнитном поле и может вызывать дополнительное рассеяние или локальное перераспределение вещества.

Для микронных и субмикронных частиц зарядовые эффекты способны играть существенную роль, поскольку отношение заряда к массе у них велико. Для частиц порядка 10–100 мкм при сходном материале масса возрастает значительно быстрее, чем характерный заряд, поэтому относительное влияние электромагнитных возмущений уменьшается. Это не означает, что зарядовые эффекты можно игнорировать, однако показывает, что выбор более крупной рабочей фракции одновременно снижает как радиационные, так и зарядово-плазменные риски.

В первом приближении зарядовый фактор можно учитывать как дополнительное условие допустимости:

$$D_{\text{charge}} \leq D_{\text{charge,allow}}$$

где:

резонансным возмущениям, а также как основание для рассмотрения резонансных областей и щелей Кирквуда как зон повышенной динамической неустойчивости.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781139174817>

- D_{charge} (charge degradation factor) — вклад зарядовых и плазменных процессов в деградацию рабочего профиля;
- $D_{\text{charge,allow}}$ (allowable charge degradation) — допустимый уровень такого вклада для выбранного срока службы.

Данная запись не является завершённой моделью плазменной динамики частиц. Она лишь фиксирует, что зарядовое состояние должно учитываться при оценке долговечности структуры, особенно при наличии мелкой фракции. В практическом плане это приводит к инженерному требованию контролировать не только массу и концентрацию вещества, но и возможные изменения распределения, вызванные электромагнитными и плазменными процессами.

Потоки микрометеороидов, локальные пылевые возмущения и редкие солнечные события также способны вносить вклад в деградацию структуры. Для первого рабочего сценария их влияние предполагается второстепенным по сравнению с радиационными, гравитационными и фазовыми механизмами деградации, однако при увеличении срока службы структуры данные процессы должны учитываться как дополнительные факторы риска.

Внутренние факторы деградации структуры

Даже при полном отсутствии внешних возмущений структура не является абсолютно неизменной системой. Поскольку она состоит из большого числа частиц, обладающих конечным разбросом параметров, со временем начинают проявляться внутренние механизмы деградации. Они связаны не столько с потерей вещества, сколько с постепенным нарушением согласованности распределения частиц внутри рабочего профиля.

Наиболее важными внутренними механизмами являются рост фазового разброса, поперечное расплывание структуры, взаимные столкновения частиц, изменение размерного состава и локальные нарушения концентрации вещества.

Рост фазового разброса и поперечное расплывание

Внутренние факторы деградации связаны прежде всего с тем, что структура не является абсолютно холодным геометрическим объектом. Даже если частицы изначально высвобождены в нужной области, они имеют конечный разброс скоростей и положений. Поэтому с течением времени возникает фазовое расплывание: частицы всё меньше соответствуют исходному профилю, а структура теряет векторную и пространственную согласованность.

Для первого приближения поперечное расплывание активного коридора можно оценить как:

$$T_{\text{spread}} \sim r / \sigma_{\text{perp}}$$

где:

- T_{spread} (spreading time) — характерное время поперечного расплывания активного коридора структуры;
- r (corridor radius) — характерный радиус активного коридора или допустимой области нахождения частиц относительно центральной траектории;
- σ_{perp} (transverse velocity dispersion) — поперечный разброс скоростей частиц относительно основного направления движения.

Величина T_{spread} задаёт характерный временной масштаб, на котором накопленный поперечный разброс скоростей начинает приводить к заметному расширению рабочего профиля структуры и снижению концентрации вещества в активном коридоре.

Эта оценка показывает, почему для структуры важна не только масса вещества, но и качество формирования. При одном и том же радиусе активного коридора срок сохранения рабочего профиля может отличаться на порядки в зависимости от того, насколько мал поперечный разброс скоростей.

Ниже приводится упрощённая параметрическая оценка, показывающая чувствительность срока сохранения рабочего профиля к поперечному разбросу скоростей частиц. Данный пример используется для иллюстрации инженерного значения параметра $\sigma_{\text{перп}}$ и не заменяет последующего расчёта конкретного участка структуры.

Если принять $r = 10 \text{ км} = 10^4 \text{ м}$, то:

при $\sigma_{\text{перп}} = 10^{-3} \text{ м/с}$:

$T_{\text{spread}} \sim 10^4 / 10^{-3} = 10^7 \text{ секунд}$

то есть около 116 суток;

при $\sigma_{\text{перп}} = 10^{-4} \text{ м/с}$:

$T_{\text{spread}} \sim 10^4 / 10^{-4} = 10^8 \text{ с}$

то есть около 3,2 года;

при $\sigma_{\text{перп}} = 10^{-5} \text{ м/с}$:

$T_{\text{spread}} \sim 10^4 / 10^{-5} = 10^9 \text{ с}$

то есть около 31,7 года.

Эти оценки показывают, что для горизонта 1–30 лет главным ограничением может быть не Пойнтинг-Робертсон, а качество начального формирования и последующей коррекции профиля. При грубом формировании структура может потребовать обслуживания уже через месяцы. При базовом режиме фазовой согласованности срок до первого существенного обслуживания может составлять годы. При улучшенном режиме, когда поперечный разброс скоростей снижается примерно на порядок, структура может сохранять рабочий профиль десятилетиями.

Изменение размерного состава и локальные нарушения концентрации

Рост фазового разброса не является единственным внутренним механизмом деградации. По мере эволюции структуры могут происходить изменения размерного состава частиц и локальные нарушения концентрации вещества внутри рабочего профиля.

Подобные процессы способны изменять длину свободного пробега, режим кинетического взаимодействия, распределение импульсных нагрузок и другие параметры, определяющие эксплуатационные свойства структуры. Поэтому сохранение рабочего профиля требует контроля не только общей массы вещества, но и пространственного распределения концентрации и размерного состава рабочей фракции.

Взаимные столкновения частиц

Взаимные столкновения частиц являются ещё одним внутренним механизмом деградации. Однако в направленной разреженной среде их частота определяется не только концентрацией и размером частиц, но и относительным направлением их движения. Если частицы имеют близкие векторы скорости, то относительная скорость между ними мала, а частота разрушительных взаимных столкновений

снижается. Это отличает направленную дисперсную структуру от обычного хаотического пылевого облака. Направленность делает среду динамически менее столкновительной и более долговечной при условии, что фазовая и векторная согласованность сохраняются.

Эксплуатационные возмущения при прохождении аппаратов через структуру

Прохождение аппаратов через структуру также является фактором деградации. Аппарат при движении через среду изменяет локальное распределение частиц, может создавать зоны пониженной или повышенной концентрации, выбивать часть вещества из рабочего коридора и нарушать фазовый профиль. Поэтому эксплуатация структуры должна включать мониторинг после проходов и, при необходимости, локальное пополнение или коррекцию распределения. Чем чаще используется структура, тем важнее становится обслуживание.

В целом деградацию орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры можно представить как совокупность нескольких процессов:

$$D_{\text{total}} = D_{\text{rad}} + D_{\text{PR}} + D_{\text{grav}} + D_{\text{orb}} + D_{\text{plasma}} + D_{\text{spread}} + D_{\text{coll}} + D_{\text{use}}$$

где:

D_{total} (total degradation) — суммарная деградация рабочего профиля структуры;

- D_{rad} (radiation degradation) — вклад радиационного давления;
- D_{PR} (Poynting-Robertson degradation) — вклад эффекта Пойнтинга- Робертсона;
- D_{grav} (gravitational degradation) — вклад гравитационных возмущений;
- D_{orb} (orbital degradation) — вклад дифференциальной прецессии и орбитального рассогласования;
- D_{plasma} (plasma degradation) — вклад плазменных и зарядовых процессов;
- D_{spread} (profile spreading degradation) — вклад фазового и поперечного расплывания рабочего профиля;
- D_{coll} (collision degradation) — вклад взаимных столкновений частиц;
- D_{use} (operational degradation) — вклад эксплуатационных возмущений, возникающих при прохождении аппаратов через структуру.

Параметры функции D не являются независимыми величинами. Они представляют собой обобщённые показатели отдельных механизмов деградации, каждый из которых может зависеть от параметров среды, характеристик аппарата, условий размещения структуры и режима её эксплуатации.

Эта запись не должна пониматься как простое арифметическое сложение независимых величин в готовом проектном расчёте. Она задаёт перечень механизмов, которые должны быть учтены при оценке срока службы. В конкретном расчёте некоторые вклады могут быть доминирующими, а другие — второстепенными. Для первого рабочего участка во внутренней части главного пояса астероидов на горизонте лет и десятилетий ожидается, что главным будет не полный физический уход вещества, а потеря рабочего профиля: рост $\sigma_{\text{перп}}$, снижение концентрации в активной зоне, нарушение фазовой и векторной согласованности, орбитальное рассогласование и последствия проходов аппаратов.

Следовательно, долговечность структуры должна оцениваться не как время до исчезновения вещества, а как время до первого выхода параметров за пределы допустимого рабочего режима:

$$T_{\text{service_first}} = \min(T_{\text{conc}}, T_{\text{phase}}, T_{\text{vec}}, T_{\text{spread}}, T_{\text{PR}}, T_{\text{orb}}, T_{\text{charge}}, T_{\text{use}})$$

где:

- $T_{\text{service_first}}$ (first service interval) — расчётный срок до первого существенного обслуживания структуры;
- T_{conc} (concentration lifetime) — срок до недопустимого изменения концентрации вещества в рабочем профиле;
- T_{phase} (phase coherence lifetime) — срок до недопустимого фазового рассогласования частиц;
- T_{vec} (vector coherence lifetime) — срок до недопустимой потери векторной согласованности движения частиц;
- T_{spread} (spreading lifetime) — срок поперечного расплывания активного коридора;
- T_{PR} (Poynting–Robertson lifetime) — срок, связанный с Пойнтинг–Робертсоновским смещением частиц;
- T_{orb} (orbital coherence lifetime) — срок, связанный с дифференциальной прецессией и орбитальным рассогласованием структуры;
- T_{charge} (charge degradation lifetime) — срок до недопустимого влияния зарядовых и плазменных процессов;
- T_{use} (operational lifetime) — срок до обслуживания, определяемый эксплуатационными проходами аппаратов через структуру.

Оператор $\min$ показывает, что срок до первого существенного обслуживания определяется наиболее быстрым механизмом деградации. Следовательно, долговечность структуры задаётся не средним состоянием среды и не общей массой вещества, а тем параметром рабочего профиля, который первым выходит за пределы допустимого диапазона.

В настоящей версии эти механизмы не рассматриваются как второстепенные. Они включаются в критерии срока службы структуры и должны проверяться для каждой выбранной области размещения. Поэтому долговечность первого участка не может задаваться только массой вещества или частотой обслуживания: она должна определяться минимальным временем выхода из рабочего диапазона по концентрации, фазовой согласованности, векторному направлению, радиационной эволюции, орбитальной прецессии и зарядово-плазменным эффектам.

Эта запись фиксирует инженерный подход: обслуживание требуется тогда, когда первым из критических механизмов выводит структуру из рабочего диапазона. Для выбранного диапазона частиц 10–100 мкм значение T_{PR} может быть намного больше эксплуатационного горизонта первого участка, но это не позволяет игнорировать Пойнтинг–Робертсон; оно лишь показывает, что для первых лет и десятилетий доминировать могут другие механизмы.

Основной вывод главы.

деградация = потеря рабочего профиля, а не потеря массы.

Таким образом, в рамках настоящей работы деградация орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры должна пониматься прежде всего как потеря рабочего профиля, а не как потеря массы вещества сама по себе. Структура сохраняет свою функцию только до тех пор, пока концентрация частиц, фазовая и векторная согласованность, размерный состав, число Кнудсена и другие эксплуатационные параметры остаются в пределах допустимого диапазона.

Следовательно, долговечность структуры определяется не только количеством внесённого вещества, но и скоростью ухода рабочего профиля из допустимого состояния. Такая постановка переводит вопрос срока службы из общего рассуждения о рассеивании вещества в систему проверяемых критериев: какие

параметры деградируют, какие механизмы определяют эту деградацию и какие действия необходимы для восстановления инфраструктурной функции структуры.

10. Замедление деградации и компенсация потерь

После определения деградации как выхода рабочего профиля из эксплуатационного диапазона необходимо рассмотреть, каким образом этот процесс может быть замедлен или компенсирован. Для настоящей постановочной работы важно не предполагать, что структура будет сохраняться неизменной, а задать критерии, при которых её рабочие параметры могут поддерживаться в течение заданного эксплуатационного горизонта.

Более полный вид оценки может учитывать несколько независимых или частично связанных каналов деградации:

$$1 / T_{\text{nat}} \sim 1 / T_{\text{coll}} + 1 / T_{\text{grav}} + 1 / T_{\text{rad}} + 1 / T_{\text{plasma}},$$

где:

- T_{nat} (natural degradation time) — характерное время естественной деградации структуры без обслуживания;
- T_{coll} (collision degradation time) — характерное время деградации, определяемое взаимными столкновениями частиц;
- T_{grav} (gravitational degradation time) — характерное время деградации, связанное с гравитационным рассеянием, орбитальным рассогласованием и ростом фазового разброса;
- T_{rad} (radiation degradation time) — характерное время деградации, связанное с радиационным давлением, эффектом Пойнтинга — Робертсона и другими радиационными воздействиями;
- T_{plasma} (plasma degradation time) — характерное время деградации, определяемое зарядовыми и плазменными процессами.

Величина T_{nat} задаёт интегральный временной масштаб естественного сохранения рабочего профиля структуры при отсутствии обслуживания. Чем меньше значение одного из отдельных времён деградации, тем сильнее его влияние на общий срок сохранения структуры.

Параметры T_{coll} , T_{grav} , T_{rad} и T_{plasma} следует рассматривать как укрупнённые каналы потерь, объединяющие отдельные механизмы деградации рабочего профиля, рассмотренные в предыдущей главе. В частности, внутри них могут проявляться столкновительная эволюция, орбитальное рассогласование, радиационные воздействия, зарядово-плазменные процессы и другие механизмы потери эксплуатационных параметров.

Поэтому данная запись не претендует на роль полной динамической модели деградации. Её задача состоит в том, чтобы показать принципиальный факт: срок естественного сохранения структуры определяется не одним процессом, а совокупностью независимых или частично связанных каналов потерь, каждый из которых способен ограничивать долговечность рабочего профиля.

При доминировании одного канала именно он задаёт характерное время деградации рабочего профиля. При сопоставимых вкладах нескольких каналов их влияние суммируется, и структура быстрее теряет заданную концентрацию, фазовую согласованность, векторное направление или допустимый режим взаимодействия с аппаратом.

Следовательно, задача долговечности состоит не в абстрактном предотвращении деградации, а в определении наиболее сильных каналов потерь и способов их ограничения. Без обслуживания срок сохранения структуры определяется естественными процессами деградации. При наличии обслуживания ключевым становится другой критерий: может ли производственно-логистический узел восстанавливать рабочие параметры быстрее, чем структура выходит из допустимого эксплуатационного диапазона.

Обслуживание не устраняет сами каналы деградации, но может увеличивать эксплуатационное время структуры за счёт пополнения вещества, коррекции распределения, восстановления плотности и поддержания фазовой согласованности. Поэтому эксплуатационный срок структуры должен рассматриваться отдельно от естественного времени деградации. В инженерном смысле задача состоит не в том, чтобы полностью исключить распад или рассеяние, а в том, чтобы поддерживать рабочие параметры структуры в допустимом диапазоне.

При этом поддержание рабочих параметров не должно пониматься только как добавление новой массы. Для орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры важно не просто вернуть утраченное количество вещества, а восстановить рабочий профиль. Это означает восстановление допустимой концентрации, размерного состава, морфологии частиц, фазовой согласованности, векторного направления движения и распределения вещества по активному коридору.

Поэтому обслуживание структуры должно оцениваться по двум связанным уровням. Первый уровень — массовый: достаточно ли вещества подаётся для компенсации потерь. Второй уровень — профильный: действительно ли поданное вещество входит в рабочий режим, а не создаёт хаотическое облако, зоны перенасыщения, опасные фракции или дополнительный фазовый разброс.

Именно второй уровень связывает долговечность структуры с последующей практической частью работы. Если поданное вещество не входит в рабочий профиль, то формальное выполнение условия компенсации массы ещё не означает восстановления инфраструктурной функции. Поэтому в дальнейшем должен отдельно учитываться коэффициент рабочего включения вещества, показывающий, какая доля высвобожденной фракции действительно становится частью рабочего профиля.

Для настоящей концепции особенно важно различать физическую долговечность и эксплуатационную долговечность. Физическая долговечность описывает время, в течение которого вещество остаётся в выбранной области. Эксплуатационная долговечность описывает время, в течение которого структура остаётся пригодной для выполнения инфраструктурной функции. Вторая величина может быть меньше первой, поскольку даже при сохранении вещества структура может потерять фазовую согласованность, допустимый размерный состав или требуемую плотность. Но она может быть и больше времени естественной деградации отдельных участков, если обслуживание обеспечивает восстановление рабочих параметров.

Минимальным требованием к такой структуре является не абсолютная стабильность, а наличие обслуживаемого режима. Структура должна допускать мониторинг, локальную коррекцию, пополнение вещества и восстановление фазового распределения. В этом смысле её следует сравнивать не с естественным облаком, которое либо сохраняется, либо рассеивается, а с инфраструктурным

объектом, эксплуатационные свойства которого поддерживаются в заданном диапазоне.

Эксплуатационная долговечность может рассматриваться в двух вариантах: без обслуживания и с обслуживанием. В первом случае срок работы структуры ограничивается естественной деградацией: ростом фазового разброса, изменением концентрации, уходом частиц из рабочего диапазона, радиационным воздействием, гравитационными возмущениями и зарядово-плазменными процессами. Во втором случае эксплуатационный срок может быть увеличен за счёт пополнения вещества, коррекции распределения, восстановления плотности и поддержания фазовой согласованности.

Поэтому эксплуатационная долговечность без обслуживания показывает минимальный срок сохранения структуры как самостоятельного объекта, а эксплуатационная долговечность с обслуживанием показывает её реальный инфраструктурный потенциал.

11. Инфраструктурная значимость долговечности

Важным следствием предыдущих глав является то, что срок формирования структуры не обязан быть меньше срока её первого использования. Для инфраструктурных объектов характерно иное соотношение времени: подготовка, развёртывание и обслуживание системы могут занимать значительно больше времени, чем отдельный эксплуатационный акт. Поэтому орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура должна оцениваться не по сравнению времени формирования и времени одного прохождения аппарата, а по совокупному инфраструктурному эффекту.

Для такой оценки важно не переносить на структуру критерии одиночного двигателя. Двигательная установка оценивается прежде всего по создаваемому Δv , тяге, удельному импульсу, ресурсу и массе. Инфраструктурная среда движения оценивается иначе: по тому, насколько она меняет условия прохождения участка для серии аппаратов, снижает требования к отдельной коррекции, повышает повторяемость режима движения, расширяет допустимый коридор входа и создаёт обслуживаемую область с заранее заданными физическими параметрами.

Поэтому прямой импульсный вклад Δv_{dust} следует рассматривать как один из физических эффектов структуры, но не как полный критерий её целесообразности. Он показывает наличие кинетического взаимодействия со средой, однако инфраструктурная значимость определяется более широким изменением условий движения.

Такой эффект включает несколько связанных параметров: сколько раз структура может быть использована, насколько она снижает сложность последующих полётов, насколько повышает предсказуемость движения, насколько расширяет допустимое окно входа в рабочий участок и насколько её обслуживание эффективнее повторного создания условий для каждой отдельной миссии. В этом смысле долговечность структуры является не второстепенным эксплуатационным свойством, а одним из главных критериев её инфраструктурной значимости.

Более широкий инфраструктурный эффект включает снижение чувствительности к ошибке входа, расширение допустимого коридора движения, повышение

повторяемости прохождения, уменьшение части коррекционной цены и возможность использования одного подготовленного участка серией аппаратов.

Даже при длительном этапе формирования искусственная дисперсная структура может быть инфраструктурно оправдана, если она обеспечивает долговременное преимущество в регулярности, управляемости, повторяемости прохождения или стратегическом доступе к выбранной области космического пространства. При этом повторяемость использования не является самостоятельным основанием эффективности. Первичным остаётся изменение самих условий движения: искусственная дисперсная среда должна делать прохождение выбранной области более предсказуемым и управляемым. Многократное использование затем становится механизмом накопления эффекта и превращения созданной среды в устойчивое инфраструктурное преимущество.

Инфраструктурная значимость такой структуры определяется также неравномерностью удобных областей космического пространства. Несмотря на масштаб Солнечной системы, зоны, пригодные для долговременного размещения и обслуживания протяжённых дисперсных структур, распределены неравномерно. Их положение зависит от орбитальной динамики, уровня внешних возмущений, доступности вещества, возможности мониторинга, связи с повторяемыми направлениями движения аппаратов и потенциальной роли в дальнейшем расширении инфраструктуры. Поэтому раннее формирование структуры в наиболее удобной области может иметь значение не только для отдельного маршрута, но и для закрепления устойчивого режима доступа к выбранной зоне. Поэтому ценность структуры определяется не только её физическими параметрами, но и положением в пространстве.

Экономическая логика такой структуры также отличается от логики одиночной миссии. Если каждый полёт оценивается только через стоимость подъёма массы с Земли, то любая крупная космическая инфраструктура выглядит чрезмерно дорогой. Однако при переходе к локальному получению вещества, обслуживанию участка, повторному использованию аппаратов и накоплению производственно-логистических возможностей меняется сама база расчёта. Стоимость инфраструктуры начинает распределяться не на один аппарат, а на серию операций, а часть последующих действий всё меньше зависит от прямых запусков с Земли.

В этом смысле производственно-логистический узел и создаваемая им дисперсная структура могут рассматриваться как начальный элемент расширяющегося инфраструктурного контура. Такой контур не просто обслуживает отдельный участок, но постепенно создаёт вокруг себя область повышенной доступности: вещество добывается или подготавливается локально, рабочие фракции накапливаются, аппараты обслуживаются повторно, а последующие участки требуют меньшей доли операций, начинающихся с поверхности Земли.

Поэтому экономическая целесообразность здесь должна оцениваться не только по вопросу, сколько стоит первый участок, а по вопросу, способен ли он стать ядром саморасширяющейся инфраструктурной зоны. Если каждый новый цикл уменьшает зависимость от подъёма с Земли и увеличивает число возможных операций в выбранной области, возникает иной тип окупаемости: не окупаемость одного пролёта, а окупаемость расширяющегося космического производственно-логистического контура.

В самом общем виде минимальный критерий инфраструктурной окупаемости может быть записан как:

$$N_{\text{break}} \sim (C_{\text{build}} + C_{\text{service}}) / I_{\text{mission}}$$

где:

- N_{break} (break-even number of uses) — ориентировочное число использований, необходимое для достижения инфраструктурной окупаемости;
- C_{build} (build cost) — стоимость создания и первоначального развёртывания участка;
- C_{service} (service cost) — стоимость обслуживания структуры за выбранный период эксплуатации;
- I_{mission} mission (infrastructure benefit per mission) — инфраструктурный выигрыш одной миссии.

При этом I_{mission} не должно сводиться только к экономии топлива. Оно может включать уменьшение коррекционной цены, увеличение полезной нагрузки, снижение требований к точности входа, сокращение времени перелёта, снижение стоимости торможения и входа в рабочую область назначения, снижение риска потери миссии, повышение повторяемости режима движения и использование одного подготовленного участка серией аппаратов.

Таким образом, инфраструктурная значимость орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры должна оцениваться через четыре связанные группы критериев. Первая группа относится к физической долговечности: насколько долго вещество сохраняет допустимое распределение, концентрацию, размерный состав, фазовую и векторную согласованность. Вторая группа относится к обслуживаемости: насколько возможно восстановление плотности, пополнение вещества, коррекция распределения и возвращение рабочего профиля в допустимый диапазон. Третья группа относится к инфраструктурному эффекту: насколько созданная среда меняет условия последующего движения аппаратов и оправдывает длительный цикл формирования и поддержки. Четвёртая группа относится к экономике повторного использования: насколько подготовленный участок снижает совокупную цену серии миссий и способен уменьшать зависимость дальнейших операций от подъёма массы с Земли.

В настоящей версии работы долговечность рассматривается как необходимый критерий перехода от концепции искусственной дисперсной среды к инженерно проверяемой инфраструктурной постановке. Если структура не сохраняет параметры и не поддаётся обслуживанию, она остаётся искусственным дисперсным образованием без устойчивой инфраструктурной функции. Если же она сохраняет или восстанавливает рабочие параметры в течение заданного эксплуатационного периода, она может рассматриваться как обслуживаемая инфраструктурная среда движения.

Итог первой части работы

В первой части работы были определены базовые параметры орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры: размерный диапазон частиц, концентрация, длина свободного пробега, число Кнудсена, фазовая и векторная согласованность, режим взаимодействия с аппаратом, эрозионная цена, полезное действие, деградация и условия поддержания эксплуатационных параметров. Эти параметры задают теоретическую инженерно-физическую рамку настоящей постановки.

Переход к производственно-логистическому узлу

Однако сама по себе такая рамка ещё не объясняет, каким образом структура может быть сформирована, поддержана и восстановлена в реальной орбитальной области. Дисперсная среда с заданной концентрацией, размерным составом,

морфологией частиц и допустимым фазовым разбросом не возникает автоматически. Она требует источника вещества, его переработки, фракционирования, накопления, упаковки, доставки, дозированного высвобождения, мониторинга и последующей коррекции распределения.

Поэтому дальнейшее рассмотрение должно перейти от физического режима структуры к системе, способной этот режим создавать, поддерживать и расширять. Такой системой в настоящей работе является производственно-логистический узел формирования структуры. Он рассматривается не как уже существующая промышленная установка и не как произвольное дополнение к физической идее, а как необходимый класс инфраструктурных средств, без которых орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура не может перейти от расчётно-критериальной постановки к обслуживаемому инфраструктурному объекту.

Часть II посвящена производственно-логистическому узлу: его назначению, узким местам космической добычи, возможной роли малых тел и главного пояса астероидов, функциональному составу, операционному циклу, базовым расчётным критериям и инфраструктурному значению. В дальнейшем этот узел будет рассматриваться не только как средство подачи вещества, но и как ядро более широкой космической инфраструктуры, способной постепенно снижать зависимость от операций, начинающихся с поверхности Земли.

Часть II. Производственно-логистический узел формирования структуры

12. Производственно-логистический узел: понятие, назначение и место в концепции

Под производственно-логистическим узлом в настоящей работе понимается космическая система, размещённая в орбитальной области вне глубоких гравитационных колодцев и предназначенная для получения, переработки, накопления, хранения, транспортировки и использования местного вещества.

Ключевой особенностью такого узла является то, что его размещение вне глубоких гравитационных колодцев одновременно создаёт область с низкими энергетическими затратами на получение, перемещение и использование местного вещества. Благодаря этому основная масса рабочего материала может перерабатываться и использоваться без необходимости многократного подъёма с поверхности Земли или других крупных тел. Именно перенос операций в такую область составляет одно из главных преимуществ рассматриваемой инфраструктурной схемы.

Физически производственно-логистический узел может представлять собой один аппарат, группу специализированных аппаратов или распределённый комплекс технических средств, объединённых единым производственным циклом. Его задача состоит не только в выполнении отдельных операций с веществом, но и в создании локального материального контура, внутри которого добыча, переработка, хранение, подготовка рабочей фракции и транспортировка выполняются вблизи места последующего использования вещества.

В наиболее общем виде производственно-логистический узел можно рассматривать как космическую производственно-транспортную базу. Если орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура является рабочей средой движения аппаратов, то производственно-логистический узел является материальной системой, создающей, поддерживающей и расширяющей такую среду.

После определения физического режима, долговечности и инфраструктурной значимости дисперсной структуры необходимо перейти к вопросу о материальном контуре её создания.

Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура не может существовать только как расчётный профиль концентрации и фазовой согласованности. Для её практической реализации требуется система, способная получать вещество, доводить его до требуемой рабочей фракции, накапливать, хранить, перемещать, дозированно высвобождать, измерять результат и возвращать параметры среды в рабочий диапазон.

Поэтому производственно-логистический узел в настоящей работе рассматривается не как второстепенное приложение к дисперсной структуре, а как материальное ядро всей инфраструктурной схемы. Именно он связывает физическую постановку с практической возможностью создания обслуживаемой среды движения.

В практическом смысле производственно-логистический узел выступает источником вещества, производственной базой, транспортной системой и обслуживающим контуром. Дисперсная структура — это рабочая среда движения

аппаратов. Производственно-логистический узел — это источник вещества, производственная база, транспортная система и обслуживающий контур, за счёт которых такая среда может быть создана, восстановлена и поддержана в заданном эксплуатационном диапазоне. Без этого элемента настоящая постановка оставалась бы неполной: нельзя рассматривать искусственную дисперсную среду только как область с частицами, не указывая, каким образом вещество появляется в нужной зоне, доводится до требуемого размерного диапазона, удерживается до момента высвобождения и распределяется вдоль расчётной траектории.

Главная функция производственно-логистического узла состоит в том, чтобы перенести основную сложность с повторяющихся запусков вещества с Земли на долговечную локальную систему, работающую в выбранной орбитальной области. В базовой логике с Земли доставляются не крупные массы вещества для каждого нового участка структуры, а высокотехнологические аппараты, энергетические системы, перерабатывающие устройства, транспортные средства, дозирующие модули, системы мониторинга и управления. Рабочее вещество для структуры должно по возможности добываться, перерабатываться и использоваться на месте.

Иными словами, структура становится инфраструктурной не только потому, что может использоваться многократно, но и потому, что её создание опирается на долговечную систему местного производства и обслуживания. После развёртывания такой системы последующие участки структуры формируются не через повторную доставку основной массы вещества с Земли, а через работу уже созданной аппаратной системы: добычу или сбор локального материала, его переработку, подготовку рабочей фракции, упаковку, транспортировку и дозированное высвобождение. Затраты при этом не исчезают, но меняют характер и потенциально многократно снижаются: главными становятся срок службы аппаратов, ремонт, замена устаревших узлов, доступность местного вещества и способность системы многократно выполнять рабочие циклы.

Производственно-логистический узел имеет значение шире, чем формирование одной конкретной дисперсной структуры. Он создаёт в выбранной области космического пространства материальную базу, способную работать с местным веществом: получать его, перерабатывать, накапливать, перемещать и использовать в различных технических режимах. Поэтому такой узел может рассматриваться не только как средство формирования искусственной среды движения, но и как более общий инфраструктурный объект.

Локально получаемое вещество может использоваться не только для формирования орбитально-ориентированных протяжённых дисперсных структур. В зависимости от состава оно может применяться как рабочее тело, источник воды, топливо, защитная масса, конструкционный материал, расходный материал для ремонта, упаковки и обслуживания аппаратов. Поэтому производственно-логистический узел имеет самостоятельную инфраструктурную ценность: он может обслуживать аппараты, миссии и транспортные схемы, не связанные непосредственно с формированием конкретной дисперсной структуры, например выступать промежуточной заправочной или снабженческой точкой для проектов, направленных к внешним областям Солнечной системы.

Такое расширение функции принципиально важно. Если узел создаётся только ради одного участка структуры, его капитальная стоимость ложится на один результат. Если же он способен обеспечивать переработку вещества, заправку, снабжение, ремонт, накопление материалов и поддержку других аппаратов, то его значение выходит за пределы отдельного сценария. В этом случае

производственно-логистический узел становится не разовым обеспечивающим механизмом, а основной материальной базой деятельности в выбранной орбитальной области.

Следовательно, назначение производственно-логистического узла можно определить в трёх уровнях.

Первый уровень — специальный. На этом уровне узел обеспечивает формирование конкретной орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры: получение вещества, подготовку рабочей фракции, накопление, упаковку, доставку, дозированное высвобождение, диагностику распределения и коррекцию рабочего профиля. Без этого уровня структура остаётся расчётным объектом, но не становится обслуживаемой средой движения.

Второй уровень — эксплуатационный. На этом уровне узел поддерживает уже созданную структуру: компенсирует потери вещества, восстанавливает плотность, корректирует фазовый разброс, устраняет зоны недонасыщения и перенасыщения, обеспечивает повторное использование участка серией аппаратов и не допускает перехода структуры из рабочего профиля в обычное пылевое облако.

Третий уровень — инфраструктурный. На этом уровне узел перестаёт быть только средством обслуживания одной структуры и становится материальной базой деятельности в выбранной области космического пространства. Он может обеспечивать накопление вещества, заправку, снабжение, ремонт, хранение рабочих фракций, поддержку аппаратов и подготовку последующих участков. Именно этот уровень меняет экономическую логику проекта: капитальные затраты относятся уже не к одному пролёту и не к одному участку, а к расширяющемуся производственно-логистическому контуру.

Важно, что речь не идёт о введении одного неизвестного устройства, которое должно сразу решить всю задачу формирования структуры. Производственно-логистический узел следует понимать как связку операций, каждая из которых имеет собственный технологический смысл: получение вещества, его измельчение или отбор, фракционирование, контроль морфологии, накопление, упаковка, транспортировка, высвобождение и измерение результата. Критическим является не само наличие этих операций как абстрактных технических действий, а их проверка в условиях конкретной задачи: микрогравитации, вакуума, зарядово-плазменной среды, требований к размерному диапазону частиц и необходимости создать не облако, а рабочий профиль.

Поэтому дальнейшая проверка производственно-логистического узла должна быть экспериментальной и поэтапной. Сначала должны проверяться отдельные операции с рабочей фракцией и дозированной подачей, затем — связка подачи и диагностики, затем — формирование короткого контролируемого участка, и только после этого — переход к более протяжённой обслуживаемой структуре. Такое поэтапное построение не ослабляет постановку, а задаёт проверяемую траекторию перехода от концепции к проектированию.

Именно поэтому производственно-логистический узел должен быть выделен как самостоятельная часть настоящей постановки. Он не подменяет саму дисперсную структуру и не является её рабочей средой, но задаёт материальные условия её возникновения. Без него структура остаётся физически описанной, но операционно неопределённой. С ним она становится результатом работы локальной инфраструктурной системы, способной превращать вещество малых тел в управляемую среду движения.

В рамках настоящей работы производственно-логистический узел рассматривается на уровне базового инженерно-физического описания. Это означает, что здесь фиксируются его назначение, функциональные классы, операционная логика и расчётные критерии, но не детализируются конкретные методы добычи, крепления к малым телам, промышленной переработки, бурения, плавления, печати, строительства или сборки оборудования. Для данной стадии важно не описание полного промышленного комплекса, а установление того, какие функции такой узел должен выполнять, чтобы формирование дисперсной структуры перестало быть абстрактной операцией и стало инженерно описываемым процессом.

Особое значение в такой постановке имеют малые тела. В отличие от планет и крупных спутников, они не создают глубоких гравитационных колодцев, поэтому извлечение, перемещение и перераспределение вещества могут требовать существенно меньших энергетических затрат. Кроме того, малое тело может одновременно выступать источником вещества, опорной точкой для размещения оборудования и элементом более спокойной орбитальной зоны, где уровень внешних возмущений ниже, чем вблизи крупных тел. Поэтому дальнейшее рассмотрение производственно-логистического узла должно начинаться именно с малых тел как базы и источника вещества.

Таким образом, назначение производственно-логистического узла состоит в том, чтобы связать теоретически заданную дисперсную структуру с материальной системой её создания. Он отвечает на вопрос, за счёт чего структура получает вещество, как это вещество доводится до требуемого диапазона частиц, как оно удерживается и доставляется, каким образом высвобождается вдоль расчётной траектории и как затем поддерживается рабочий режим среды.

Однако возможность такого узла зависит от более общей проблемы: может ли космическая система не просто доставить аппарат к малому телу, а организовать повторяемое получение, подготовку, переработку, хранение, дозированную подачу и использование вещества в космосе. Для настоящей постановки особенно важно, что это вещество должно не просто добываться, а переводиться в контролируемую рабочую фракцию, пригодную для формирования дисперсной среды с заданными параметрами.

Поэтому дальнейшее рассмотрение должно перейти к узким местам космической добычи и космической переработки вещества. Именно эти узкие места определяют, может ли производственно-логистический узел стать не декларацией, а реальным материальным основанием для формирования и обслуживания орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры.

13. Узкие места космической добычи и роль производственно-логистического узла

Добыча, переработка, электролиз, заправка, автоматизация и использование ресурсов в космосе уже являются самостоятельными направлениями исследований и инженерных разработок. В рамках NASA и других космических программ это направление обычно обозначается как ISRU — использование местных ресурсов вместо доставки всех необходимых материалов с Земли. NASA описывает ISRU как использование природных ресурсов в месте назначения

миссии и связывает это направление с получением воды, топлива, кислорода, строительных и иных материалов¹¹.

При этом необходимо различать существование технологического направления и готовность его конкретного астероидного исполнения. Измельчение, дробление, классификация, сортировка, транспортировка сыпучих материалов, роботизированная обработка и автономное управление хорошо известны как земные промышленные и инженерные классы технологий. Однако их перенос в условия малого тела, вакуума, малой гравитации, высокой запылённости, задержки связи и ограниченного обслуживания не является простой операцией копирования земного оборудования.

Поэтому производственно-логистический узел в настоящей работе не рассматривается как уже существующая серийная промышленная система. Он задаётся как необходимый класс автономного или полуавтономного оборудования, который должен быть создан, испытан и обкатан для работы вблизи малых тел. В этом смысле речь идёт не о новой физической проблеме, а о прикладной инженерной адаптации уже существующих технологических направлений к специфической среде астероидной добычи, локальной переработки вещества и формирования контролируемой рабочей фракции.

Для первого рабочего сценария особенно важно не само наличие абстрактной “пыли”, а способность узла получать воспроизводимую рабочую фракцию. Широкий диапазон 1–100 мкм используется в работе как естественный и наблюдательный ориентир, связанный с межпланетной пылью. Рабочий инженерный диапазон для первого расчётного сценария уже и составляет порядка 10–100 мкм, поскольку он исключает наиболее проблемную мелкую фракцию. Для первого практического расчётного сценария целесообразно выделять ещё более узкий целевой диапазон 50–70 мкм, который повышает предсказуемость взаимодействия со средой и снижает зависимость первого расчётного сценария от поведения субмикронной и околомикронной пыли.

Такой выбор не означает, что вся получаемая масса будет идеально моноразмерной. Даже при качественном измельчении, классификации и последующей обработке часть вещества будет переходить в более мелкую побочную фракцию при контакте частиц, упаковке, подаче и высвобождении. Поэтому задача узла состоит не в получении абсолютно однородной пыли, а в обеспечении доминирования целевой рабочей фракции и в ограничении доли нежелательной мелкой компоненты, которая должна удаляться, возвращаться в переработку или учитываться как нерабочая часть материала.

Получение рабочей фракции с заданным диапазоном размеров, допустимой морфологией, ограниченным разбросом массы частиц и исключением опасных включений является одним из ключевых узких мест всей постановки. В условиях микрогравитации, вакуума, зарядово-плазменной среды и ограниченного обслуживания такая операция не может считаться автоматически решённой только потому, что на Земле существуют технологии сортировки и классификации порошков. Для настоящей работы важно другое: эта операция не скрывается как

¹¹ NASA — In-Situ Resource Utilization (ISRU). Используется как источник по общему определению ISRU (использования местных ресурсов) и как подтверждение связи данного направления с получением воды, топлива, кислорода, строительных материалов и других ресурсов непосредственно в месте эксплуатации космической инфраструктуры.

<https://www.nasa.gov/mission/in-situ-resource-utilization-isru/>

готовое допущение, а выделяется как один из первых технологических элементов, подлежащих экспериментальной проверке.

Поэтому первый экспериментальный этап должен проверять не только возможность дозированного высвобождения вещества, но и поведение подготовленной фракции при хранении, упаковке, транспортировке, подаче и выпуске в разреженную среду. На раннем этапе допустимо использовать заранее подготовленную фракцию, поскольку задача такого опыта состоит не в доказательстве полной астероидной промышленности, а в проверке физического режима дисперсной структуры. Локальное получение и фракционирование вещества из материала малого тела относится к следующему уровню развития производственно-логистического узла и должно проверяться отдельно.

Настоящая работа не претендует на повторное описание добычи, электролиза, заправки, автоматизации или переработки космических ресурсов как самостоятельных областей. Для данной постановки важно другое: показать, как эти уже обсуждаемые технологические направления могут быть объединены в производственно-логистический узел, обслуживающий формирование орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры и функциональное использование массовой фракции вещества.

В рамках настоящей работы важно отметить, что ряд технологических направлений, необходимых для будущего производственно-логистического узла, уже существует в виде отдельных исследовательских и инженерных программ. К ним относятся:

- использование местных ресурсов (ISRU), включая получение воды, топлива, кислорода, строительных и расходных материалов непосредственно в месте эксплуатации;
- использование астероидного вещества для снабжения, заправки и поддержки космических миссий, включая возможное получение рабочего тела, воды и других ресурсов непосредственно в космосе;
- сближение с малыми телами, их картирование, автономные операции вблизи астероидов, получение образцов и возврат вещества на Землю, что было продемонстрировано миссией OSIRIS-REx на астероиде Bennu;
- исследование состава астероидов различных классов (C-, S- и M-типы), позволяющее рассматривать малые тела как потенциальные источники воды, силикатов, металлов и других материалов¹².

Следовательно, многие отдельные элементы будущего производственно-логистического узла уже имеют собственную исследовательскую и технологическую базу. Основная проблема состоит не в отсутствии каждой отдельной операции, а в их объединении в единую долговечную систему, способную многократно работать с местным веществом и обеспечивать формирование обслуживаемой дисперсной структуры.

На текущем технологическом уровне уже продемонстрированы отдельные операции, необходимые для будущей добычи и использования вещества малых

¹²См. NASA ISRU Overview; OSIRIS-REx Mission to Asteroid Bennu; Dawn at Vesta Press Kit; The Size-Frequency Distribution of the Zodiacal Cloud: Evidence from the Solar System Dust Bands., приведённые в Приложении А.

тел: сближение с астероидом, картирование, автономные операции вблизи малого тела, забор образца и возвращение вещества на Землю. Показательным примером является миссия NASA OSIRIS-REx, в рамках которой аппарат выполнил исследование астероида Bennu, получил образец вещества и доставил капсулу с образцом на Землю 24 сентября 2023 года. Однако это была научная миссия по возврату образца, а не промышленная система добычи, переработки и регулярного использования вещества в космосе.

Следовательно, промышленная добыча вещества малых тел требует не изобретения каждой операции заново, а интеграции уже развиваемых направлений в автономный или полуавтономный производственно-логистический узел. Именно интеграция этих операций, а не каждая из них по отдельности, является главным инженерным препятствием для перехода от научных миссий к регулярному использованию вещества малых тел.

Уникальная задача настоящей работы состоит не в повторении этих направлений, а в их иной архитектурной сборке. Производственно-логистический узел рассматривается как система, которая не только получает топливо, воду, металлы или ценные компоненты, но и распределяет всё извлекаемое вещество по функциональным потокам. Более ценные или дефицитные компоненты могут использоваться для заправки, снабжения, ремонта, производства, накопления или доставки во внутренние области Солнечной системы. Массовая силикатная, металлическая или иная менее ценная фракция, которая в другой схеме могла бы восприниматься как отход или балласт, получает отдельную инфраструктурную функцию: она может использоваться для формирования орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры, защитной массы, упаковочных элементов и расходных материалов.

В этом состоит принципиальное отличие рассматриваемого узла. Он не ориентирован на извлечение одной наиболее ценной фракции и не ограничивается задачей заправки аппаратов. Его функция состоит в повышении полезности всего извлекаемого материала. Тогда добыча топлива, использование воды, накопление ценных компонентов, обслуживание аппаратов и формирование дисперсной структуры становятся не отдельными конкурирующими задачами, а разными режимами работы одной локальной инфраструктуры.

Для рассматриваемого подхода важны три основных узких места космической добычи.

Первое узкое место связано с безопасностью перемещения малых тел или крупных фрагментов. Один из возможных способов получить доступ к веществу — изменить траекторию малого тела или его части и доставить его в более удобную область работ. Однако перемещение крупного объекта целиком создаёт повышенные требования к безопасности, навигации, контролю траектории и предотвращению неконтролируемых последствий. Даже если фактическая вероятность опасного сценария мала, сама возможность потери контроля над фрагментом или малым телом делает такой подход регуляторно и общественно уязвимым. Поэтому в рамках настоящей постановки предпочтительнее не перемещать крупное тело целиком, а работать с веществом в выбранной орбитальной области, извлекая, перерабатывая и транспортируя материал ограниченными контролируруемыми партиями.

Второе узкое место связано с топливным и транспортным обеспечением. Если аппараты должны доставлять всё топливо и рабочее тело с собой, то каждый цикл добычи, транспортировки, возврата и повторной загрузки оказывается ограничен

исходным запасом. Это снижает число рабочих циклов, массу полезной нагрузки и длительность эксплуатации. Производственно-логистический узел частично снимает это ограничение, если локальное вещество может использоваться не только как материал для дисперсной структуры, но и как рабочее тело, вода, топливо или расходный материал для обслуживания аппаратов. В этом случае извлечение вещества для топлива становится более оправданным: оно обслуживает не отдельную операцию бурения или заправки, а уже развёрнутую многофункциональную базу, которая одновременно поддерживает транспорт, переработку, обслуживание и формирование структуры.

Третье узкое место связано с автоматизацией. Космическая добыча требует не одного удалённо управляемого действия, а цепочки автономных или полуавтономных операций: сближение с малым телом, выбор участка, удержание положения, извлечение материала, переработка, фракционирование, загрузка, транспортировка, мониторинг и коррекция. Современная робототехника, автономная навигация, дистанционное управление и автоматизированная обработка данных уже позволяют рассматривать такие операции как инженерную задачу, но промышленная добыча требует их объединения в долговечный производственно-логистический узел. Иными словами, проблема состоит не только в создании отдельного добывающего аппарата, а в построении устойчивой системы повторяемой работы.

Отдельно следует указать на состояние добывающего и фракционирующего оборудования. Аппараты, способные регулярно извлекать, дробить, сортировать и перерабатывать значительные объёмы вещества в условиях малой гравитации, вакуума, пылевой среды, задержки связи и ограниченного обслуживания, пока не являются готовым промышленным классом техники. Однако это ограничение не имеет статуса фундаментального физического запрета. Речь идёт о прикладной адаптации уже существующих направлений техники к конкретной среде: робототехники, автономной навигации, манипуляторов, буровых и захватных устройств, фракционирования вещества, электролиза, хранения и подачи рабочего тела.

В терминах технологической готовности это означает, что производственно-логистический узел не является физически невозможным элементом концепции, но относится к области невысокой или средней технологической готовности. Отдельные необходимые направления уже существуют: робототехника, автономная навигация, манипуляторы, забор образцов, фракционирование вещества, хранение, подача рабочего тела и элементы ISRU. Узким местом является не наличие физических принципов, а их объединение в долговечную автономную систему, способную регулярно работать с веществом малого тела и выдавать контролируемую рабочую фракцию.

Поэтому в дальнейшем оценка производственно-логистического узла должна рассматриваться не как вопрос “возможно или невозможно”, а как вопрос TRL: какие операции уже продемонстрированы, какие требуют адаптации к условиям малого тела, а какие должны быть проверены экспериментально для перехода от разовой миссии к обслуживаемой инфраструктуре.

Поэтому отсутствие готового добывающе-перерабатывающего аппарата не должно рассматриваться как самостоятельное фундаментальное препятствие. Оно является следствием того, что пока не была задана устойчивая архитектурная задача, ради которой такие аппараты должны проектироваться как серийный или

долговечный промышленный класс. При решении трёх ключевых проблем — безопасной работы с малыми телами, топливного обеспечения повторяемых циклов и достаточной автоматизации — специализированное добывающе-перерабатывающее оборудование может быть разработано как прикладное продолжение уже существующих технологических направлений.

Для производственно-логистического узла важно, что вещество малых тел не должно рассматриваться только через одну “ценную” фракцию. Астероиды различаются по составу: NASA выделяет C-, S- и M-типы, включая углеродистые, каменно-силикатные и металлические объекты. Это означает, что материал малого тела может рассматриваться как набор разных фракций и потоков использования, а не только как источник одного полезного компонента.

По аналогии с земной добычей, где полезный компонент обычно извлекается из смеси пород, вещество малого тела может быть разделено на разные функциональные потоки. Более ценные или дефицитные компоненты могут направляться на накопление, производство, заправку, снабжение аппаратов или доставку во внутренние области Солнечной системы. Летучие вещества и вода могут использоваться как источник рабочего тела и топлива. Массовая силикатная, металлическая или иная менее ценная фракция может применяться для формирования орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры, защитной массы, упаковочных элементов, расходных материалов и обслуживания аппаратов.

Такой подход меняет оценку малоценной или массовой фракции. В обычной схеме она могла бы рассматриваться как отход, балласт или технологическая проблема. В настоящей работе она получает инфраструктурную функцию: из неё может формироваться рабочая дисперсная среда, защитная масса, элементы упаковки или расходные материалы. Поэтому массовая фракция может получить практическую ценность даже в том случае, если она не является наиболее выгодной для доставки на Землю или использования как редкий ресурс.

Это также снижает зависимость производственно-логистического узла от одной экономической гипотезы. Если узел оправдывается только добычей редкой фракции, вся схема зависит от её концентрации, стоимости доставки и спроса. Если же один и тот же узел обеспечивает топливо, рабочее тело, снабжение, ремонт, расходные материалы и вещество для дисперсной структуры, то его полезность распределяется между несколькими функциями. В этом случае даже частичная переработка вещества может становиться более оправданной, потому что разные компоненты материала получают разные применения.

Таким образом, производственно-логистический узел должен рассматриваться как способ интеграции уже известных направлений космической добычи и ISRU в более широкую инфраструктурную схему. Он не заменяет исследования добычи, электролиза, заправки, автоматизации или переработки вещества, а использует их как функциональные элементы. Отличие настоящей постановки состоит в том, что массовая фракция вещества получает самостоятельное назначение: она становится материалом для формирования дисперсной структуры и связанных с ней расходных элементов.

В настоящей работе локальное вещество разделяется не на “полезное” и “бесполезное”, а на разные функциональные потоки: рабочая фракция для дисперсной структуры, материал для топлива и обслуживания, защитная масса, упаковочные и конструкционные компоненты, а также потенциально ценные фракции для накопления, производства или доставки. Поэтому производственно-

логистический узел решает узкие места космической добычи не как отдельный добывающий аппарат, а как многофункциональная локальная инфраструктура, где разные компоненты вещества усиливают экономическую и операционную оправданность друг друга.

После выделения этих узких мест можно перейти к вопросу о том, почему именно малые тела являются наиболее естественной базой для производственно-логистического узла. Их значение определяется не только наличием вещества, но и отсутствием глубоких гравитационных колодцев, возможностью локальной переработки материала и меньшей энергетической ценой перемещения вещества в выбранной орбитальной зоне.

14. Малые тела и главный пояс астероидов как база производственно-логистического узла

Производственно-логистический узел должен размещаться в такой области, где вещество может быть не только получено, но и переработано, перемещено, использовано и обслужено в повторяемых рабочих циклах. Поэтому для рассматриваемой постановке принципиальны не отдельные ценные астероиды сами по себе, а область, в которой возможно создание устойчивой локальной инфраструктуры обращения с веществом.

В качестве базового класса объектов для такого узла рассматриваются малые тела: астероиды, фрагменты малых тел, реголитовые поверхности, слабо связанные скопления вещества или иные локальные источники материала в выбранной орбитальной зоне. Их значение определяется не только наличием вещества, но и тем, что работа с ними не требует преодоления глубоких гравитационных колодцев, характерных для планет и крупных спутников.

Выбор малых тел принципиален. В отличие от планет и крупных спутников, малые тела имеют существенно меньшую массу и слабое гравитационное поле. Это означает, что извлечение вещества, его перемещение, вывод с поверхности или из окрестности объекта и последующая транспортировка к производственно-логистическому узлу требуют меньших энергетических затрат. Для рассматриваемой постановки это является одним из ключевых условий: если рабочее вещество приходится поднимать из глубокой гравитационной ямы, инфраструктурная логика резко ослабляется, поскольку значительная часть энергии и аппаратного ресурса расходуется не на формирование структуры, а на преодоление гравитационного потенциала источника.

Малое тело в такой схеме может выполнять несколько функций. Оно может быть источником вещества, опорной зоной для размещения оборудования, объектом накопления материала, ориентиром для навигации, промежуточной базой обслуживания аппаратов и элементом более широкой системы снабжения. В простейшем случае один и тот же объект может совмещать несколько функций. Однако для инженерного описания полезно различать как минимум два типа малых тел:

- базовое малое тело;
- сырьевое малое тело.

Базовое малое тело — это объект или связанная с ним орбитальная зона, рядом с которой размещается основная часть производственно-логистического узла:

энергетические системы, перерабатывающие модули, накопители, сервисные аппараты, системы мониторинга и управления. Его значение состоит не только в наличии вещества, но и в возможности использовать его как устойчивую опорную точку для многократных рабочих циклов. Базовое тело должно быть достаточно удобно расположено, чтобы рядом с ним можно было организовать переработку, накопление, загрузку аппаратов и их возврат после выполнения циклов формирования структуры.

Сырьевое малое тело — это объект, фрагмент или локальный участок, вещество которого используется как расходный материал для производственно-логистического цикла. Оно может совпадать с базовым телом, но не обязано совпадать с ним. В более развитой схеме базовое тело может выполнять функцию опорной зоны, а сырьевые тела — функцию источников вещества, подводимых, обрабатываемых или частично перерабатываемых в пределах обслуживаемой области.

Такое различие важно потому, что производственно-логистический узел не должен зависеть от единственного “идеального” астероида. Для инфраструктурной постановке предпочтительна область, где возможно сочетание нескольких функций: размещение оборудования, доступ к веществу, переработка, накопление, обслуживание аппаратов и создание рабочего участка структуры. Именно поэтому главный пояс астероидов рассматривается не как набор отдельных ценных объектов, а как потенциальная область для формирования локальной производственно-логистической инфраструктуры.

Главный пояс астероидов имеет несколько преимуществ для такой постановки. Во-первых, он содержит большое количество малых тел и локального вещества. Во-вторых, он расположен вне плотной околоземной инфраструктуры, что снижает риски для действующих орбитальных объектов и для Земли. В-третьих, он технологически ближе и доступнее, чем более удалённые области Солнечной системы. В-четвёртых, он позволяет выбирать участки с более спокойной орбитальной динамикой, где внешние возмущения могут быть ниже, чем вблизи крупных планет, плотных спутниковых систем или активных транспортных зон.

Для настоящей постановки особенно важна не вся область главного пояса, а его внутренняя часть. В качестве предварительной расчётной зоны может рассматриваться область порядка 2,3–2,5 а.е. от Солнца. Эта зона выбирается не как точный готовый адрес будущей структуры, а как область поиска, сочетающая относительную близость к Земле, наличие малых тел, доступность локального вещества и возможность подбора динамически более спокойного участка.

При этом для первичной демонстрационно-инфраструктурной миссии может рассматриваться и более близкая область у внутренней границы главного пояса, порядка 2,0 а.е.. Главный аргумент в пользу такого предварительного этапа связан не только с дальностью, а с риском неполной наблюдательной картины малых тел. По мере продвижения к главному поясу возрастает значение некаталогизированных объектов: тел десятков метров, метрового и субметрового масштаба, фрагментов и локальных пылевых скоплений. Крупные астероиды в основном наблюдаемы, но именно малые тела представляют проблему для первичной миссии: они многочисленны, хуже фиксируются дистанционными обзорами и могут требовать локальной разведки траектории.

Современные наблюдения подтверждают, что нижняя граница обнаруживаемых объектов главного пояса постепенно смещается вниз, но это одновременно показывает неполноту прежней картины. Обнаружение объектов порядка 100–200

м в главном поясе требовало высокой чувствительности JWST, а последующие работы с данными JWST позволили выявить десятиметровые астероиды как один из самых малых наблюдательно подтверждённых классов объектов главного пояса. Это означает, что популяция малых тел существует, но её учёт остаётся неполным для метрового и субметрового диапазона.¹³

Поэтому более близкая область у внутренней границы главного пояса может снижать риск первого развёртывания именно потому, что сокращает глубину входа в область с растущей плотностью малых и плохо каталогизированных тел. Она уменьшает длину участка, который необходимо предварительно диагностировать, упрощает построение безопасного коридора доставки и возврата, снижает требования к числу разведывательных и диагностических аппаратов и позволяет раньше проверить производственно-логистический цикл на ограниченной локальной конфигурации.

Однако более близкая область около 2,0 а.е. не является автоматически лучшей для первого полноценного инфраструктурного сценария. Она может находиться ближе к резонансным и динамически менее удобным зонам, а также хуже соответствовать задаче долговременного обслуживания. Поэтому в настоящей работе область порядка 2,3–2,5 а.е. сохраняется как оптимальный расчётный вариант для полноценного рабочего участка, а более близкая область у внутренней границы главного пояса рассматривается как возможный предварительный этап снижения риска первого развёртывания.

Такой выбор имеет компромиссный характер. С одной стороны, внутренняя часть главного пояса существенно дальше околоземного пространства, что усложняет доставку оборудования, связь, обслуживание и начальное развёртывание. С другой стороны, она безопаснее для Земли и действующей околоземной инфраструктуры, а также лучше подходит для первого рабочего полномасштабного сценария, чем область вблизи Земли, где операции с дисперсным веществом сталкиваются с повышенными требованиями безопасности, правовыми ограничениями и риском для спутниковой инфраструктуры.

При выборе конкретного участка принципиально важно учитывать резонансную структуру главного пояса. Распределение астероидов содержит щели Кирквуда, связанные со средними резонансами с Юпитером, включая резонансы 3:1, 5:2, 7:3 и 2:1. Поэтому расчётная зона 2,3–2,5 а.е. не должна пониматься как автоматическое указание места размещения. Конкретный участок должен выбираться вне выраженных резонансных областей, вдали от крупных возмущающих тел и с учётом локальной динамической устойчивости.

В рамках рассматриваемой постановке главный пояс астероидов важен не только как источник рабочей фракции для дисперсной структуры. Локально получаемое вещество может использоваться для нескольких функциональных потоков: рабочей дисперсной фракции, топлива или рабочего тела, защитной массы, упаковочных материалов, конструкционных компонентов, ремонтных материалов и потенциально ценных фракций. Поэтому производственно-логистический узел

¹³ Burdanov A.Y. et al. JWST Sighting of Decametre Main-Belt Asteroids and View on Meteorite Sources. Nature, 2025. Используется как подтверждение обнаружения десятиметровых астероидов главного пояса с помощью JWST и как свидетельство того, что нижняя наблюдаемая граница популяции малых тел продолжает смещаться в область объектов размером порядка нескольких десятков метров
<https://arxiv.org/html/2502.01744v1>

получает самостоятельную инфраструктурную ценность: он может обслуживать не только конкретный участок дисперсной структуры, но и аппараты, миссии и транспортные схемы, проходящие через выбранную область.

Это особенно важно для экономической и операционной логики проекта. В обычной схеме астероидная добыча часто рассматривается через поиск ценной фракции: воды, металлов, редких элементов или иных ресурсов. В настоящей работе вещество малого тела не делится жёстко на “полезное” и “бесполезное”. Ценная фракция может использоваться для топлива, рабочего тела, производства, ремонта, накопления или доставки, а менее ценная массовая фракция может получать инфраструктурную функцию как материал для формирования орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры. Тем самым полезность извлекаемого материала повышается: разные компоненты вещества могут обслуживать разные задачи одного локального узла.

При этом главный пояс не следует понимать как область, где можно произвольно перемещать любые массы вещества без ограничений. Работа с малыми телами требует оценки состава, структуры, механической прочности, вращения, связности, пылевой опасности, устойчивости орбиты и рисков фрагментации. Для первого рабочего сценария поэтому не выбирается конкретный астероид. Конкретный объект потребовал бы отдельного анализа орбиты, состава, доступности, механики добычи, безопасности операций и совместимости с выбранной траекторией формирования структуры.

В настоящей работе достаточно задать класс требуемых объектов. Базовое малое тело должно соответствовать следующим условиям:

- находиться в динамически допустимой области, пригодной для длительного обслуживания;
- быть расположенным вне выраженных резонансных зон и вдали от крупных возмущающих тел;
- иметь орбитальные параметры, позволяющие организовать повторяемые рабочие циклы аппаратов;
- обеспечивать возможность размещения или сопровождения производственно-логистического оборудования;
- допускать создание зоны накопления, загрузки, обслуживания и мониторинга;
- находиться в области, где деградация формируемой структуры не становится чрезмерно быстрой.

Сырьевое малое тело или сырьевой участок должен соответствовать другим требованиям:

- иметь доступный материал, пригодный для переработки;
- обеспечивать получение минеральной, силикатной, металлической или смешанной фракции;
- позволять извлекать вещество без преодоления глубокой гравитационной ямы;
- допускать механическую переработку, измельчение, классификацию и отбраковку нежелательной фракции;
- иметь такой состав, при котором часть вещества может использоваться не только для дисперсной структуры, но и для иных потоков производственно-логистического узла.

Следует подчеркнуть, что выбор базового и сырьевого тела не требует появления новых физических принципов. Необходимые операции относятся к области поиска, диагностики, добычи, переработки, фракционирования и логистики вещества. Поэтому они должны рассматриваться прежде всего как задача технологической готовности и поэтапного повышения TRL, а не как фундаментальное ограничение самой концепции. Низкая или средняя технологическая готовность отдельных операций означает необходимость экспериментальной проверки, но не отменяет физическую реализуемость производственно-логистического узла как класса инфраструктуры.

Разделение базового и сырьевого тела позволяет не перегружать первый сценарий требованием найти один объект, который одновременно идеально подходит для всех функций. В начальном сценарии допустимо, что базовая зона и сырьевой источник находятся рядом или частично совпадают. В более развитой конфигурации производственно-логистический узел может использовать несколько сырьевых источников, а базовая область может выполнять функцию устойчивого центра переработки, накопления и обслуживания.

Главное преимущество такого подхода состоит в переходе от логики отдельной экспедиции к логике локальной инфраструктуры. Если каждый астероид рассматривается как самостоятельный объект добычи, то каждая миссия требует отдельного обоснования, отдельной доставки оборудования и отдельного возврата результата. Если же выбранная область рассматривается как производственно-логистическая зона, то аппараты, перерабатывающие модули, накопители, средства обслуживания и системы мониторинга начинают работать многократно.

Поэтому главный пояс астероидов в настоящей работе рассматривается не как “место мечты” и не как произвольная дальняя область, а как наиболее логичная зона для первого развитого рабочего сценария производственно-логистического узла и обслуживаемой дисперсной структуры. Околоземное пространство может быть удобнее для предварительных экспериментов, связи, диагностики и быстрой проверки отдельных эффектов, включая дозированную подачу, поведение рабочей фракции и взаимодействие аппарата с разреженной дисперсной средой. Однако оно хуже подходит для масштабирования операций с дисперсным веществом, длительного размещения протяжённых участков, работы с крупными массами материала и снижения зависимости от подъёма вещества с Земли.

Внутренняя часть главного пояса, напротив, сочетает несколько признаков, важных именно для инфраструктурного подхода: безопасность для Земли, наличие большого количества локального вещества, отсутствие глубоких гравитационных колодцев, возможность выбора динамически более спокойных зон, наличие множества потенциальных источников материала и достаточную технологическую достижимость по сравнению с внешними областями Солнечной системы. Поэтому её значение связано не только с тем, что там есть астероиды, а с тем, что такая область может стать базой повторяемых производственно-логистических операций.

При этом выбор внутренней части главного пояса не должен пониматься как окончательно доказанная оптимальная зона. Для конкретного участка необходимо дополнительно проверять положение относительно резонансов, величину дифференциальной прецессии, скорость накопления фазового разброса, доступность вещества, условия связи, энергетику транспортных циклов и частоту обслуживания структуры. В настоящей версии главный пояс выступает как обоснованный кандидат для первого развитого инфраструктурного сценария, а не как уже рассчитанная конечная область размещения.

Таким образом, малые тела и внутренняя часть главного пояса астероидов образуют естественную базу производственно-логистического узла. Их значение определяется не только наличием вещества, но и отсутствием глубоких гравитационных колодцев, возможностью локальной переработки материала, снижением энергетической цены перемещения вещества, наличием множества потенциальных источников и возможностью построения не разовой добывающей миссии, а устойчивой инфраструктурной области. Именно такая область необходима для дальнейшего перехода к функциональному составу производственно-логистического узла.

15. Функциональный состав производственно-логистического узла

После выбора малых тел и внутренней части главного пояса астероидов как естественной базы производственно-логистического узла необходимо определить его функциональный состав. В настоящей работе такой узел не рассматривается как готовый промышленный проект с конкретными машинами, размерами, двигателями, способами крепления к астероиду и окончательной схемой переработки вещества. На данном уровне важно другое: выделить минимальные классы систем, без которых невозможно перейти от локального вещества малого тела к формированию орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры.

Функциональный состав узла в настоящей работе задаётся не как перечень готовых машин, а как набор обязательных операций, без которых дисперсная структура не может быть создана как рабочий профиль. Для рассматриваемой постановки недостаточно просто добыть вещество или выбросить его в пространство. Необходимо получить материал, подготовить его до требуемой фракции, исключить опасные включения, накопить и упаковать вещество, доставить его к зоне высвобождения, дозированно выпустить, измерить фактическое распределение и скорректировать результат.

Поэтому производственно-логистический узел должен рассматриваться как связка добывающих, перерабатывающих, фракционирующих, транспортных, диагностических и корректирующих функций. Критическим является не наличие каждой операции по отдельности, а их согласование в едином цикле формирования и обслуживания структуры.

Производственно-логистический узел должен обеспечивать не одну операцию, а повторяемую цепочку: получение вещества, переработку, фракционирование, накопление, упаковку, транспортировку, дозированное высвобождение, мониторинг и обслуживание. Поэтому его функциональный состав должен рассматриваться не как набор независимых аппаратов, а как связанная система, в которой сбой одного звена ограничивает работу всего контура.

При этом важно не преувеличивать масштаб такого узла. Речь не идёт о полноценной космической промышленной цивилизации, заводском комплексе земного типа или универсальной фабрике, способной производить все виды космического оборудования. Минимальный производственно-логистический узел — это ограниченная система, предназначенная для конкретной инфраструктурной задачи: получить локальное вещество, довести его до требуемого рабочего состояния, временно накопить, передать аппаратам-носителям или дозаторам и обеспечить повторяемое высвобождение в выбранной области.

С этой точки зрения функциональный состав узла не является чрезмерно большим. Он включает не произвольный набор машин, а несколько обязательных классов подсистем: базовую зону, энергетический блок, добывающе-подающий блок, переработку и фракционирование, накопление и упаковку, транспортно-дозирующие аппараты, мониторинг, обслуживание и управление. Эти подсистемы могут быть реализованы разными способами и частично совмещаться в одних аппаратах. Например, транспортный аппарат может выполнять функции дозатора, аппарат-дозатор может участвовать в мониторинге, а часть сервисных функций может быть встроена в базовую платформу.

Необходимо также различать существование технологических направлений и готовность их конкретного астероидного исполнения. Измельчение, дробление, классификация, сортировка, транспортировка сыпучих материалов, роботизированная обработка и автономное управление хорошо известны как земные промышленные и инженерные классы технологий. Однако их перенос в условия малого тела, вакуума, малой гравитации, высокой запылённости, задержки связи и ограниченного обслуживания не является простой операцией копирования земного оборудования.

Поэтому производственно-логистический узел в настоящей работе не рассматривается как уже существующая серийная промышленная система. Он задаётся как необходимый класс автономного или полуавтономного оборудования, который должен быть создан, испытан и обкатан для работы вблизи малых тел. В этом смысле речь идёт не о новой физической проблеме, а о прикладной инженерной адаптации уже существующих технологических направлений к специфической среде астероидной добычи, локальной переработки вещества и формирования контролируемой рабочей фракции.

Такое уточнение принципиально. Если узел описывать как готовую фабрику, постановка становится технологически завышенной. Если же узел описывать как перечень минимальных функций, требуемых для первого рабочего сценария, его статус становится корректнее: он не доказывает, что все системы уже готовы к немедленному запуску, а задаёт инженерные требования к оборудованию, без которого практическая реализация структуры невозможна.

Минимально такой узел должен включать следующие функциональные блоки.

Базовая зона размещения оборудования

Базовая зона — это область, в которой размещаются или обслуживаются основные элементы производственно-логистического узла. Она может быть связана с базовым малым телом, его окрестностью, устойчивой орбитальной конфигурацией или совокупностью аппаратов, работающих рядом с выбранным объектом. Её задача состоит в том, чтобы обеспечить повторяемость операций: получение вещества, переработку, накопление, загрузку аппаратов, возврат аппаратов после рабочих циклов и их обслуживание.

Базовая зона не обязательно должна быть жёстко закреплена на поверхности астероида. В зависимости от характеристик малого тела оборудование может размещаться на поверхности, вблизи поверхности, на связанных орбитах, на платформе сопровождения или в распределённой конфигурации. Для малых тел с очень слабой гравитацией прямое закрепление и удержание оборудования может быть сложной задачей, поэтому базовая зона должна рассматриваться не как “площадка завода” в земном смысле, а как управляемая область повторяемых операций.

Основные требования к базовой зоне следующие:

- возможность размещения или сопровождения энергетического оборудования;
- доступ к источнику вещества или к транспортируемому сырью;
- возможность накопления и временного хранения подготовленной фракции;
- возможность загрузки аппаратов-носителей или дозирующих аппаратов;
- возможность возврата аппаратов после рабочих циклов;
- наличие систем мониторинга, связи, диагностики и управления;
- возможность ремонта, замены или обслуживания критических узлов.

Таким образом, базовая зона является не самостоятельной целью, а пространственно-операционной основой узла. Без неё производственно-логистическая система распадается на отдельные миссии: аппарат добыл вещество, другой аппарат переработал, третий увёз, но между ними нет повторяемой инфраструктурной связи. Базовая зона превращает эти операции в цикл.

Энергетический блок

Энергетический блок необходим для добычи, переработки, измельчения, классификации, накопления, упаковки, подачи вещества, работы датчиков, связи, навигации, коррекции орбит и обслуживания аппаратов. Без устойчивого источника энергии производственно-логистический узел не может работать как инфраструктура: он превращается в набор отдельных аппаратов с ограниченным ресурсом.

Возможный состав энергетического блока в настоящей работе не фиксируется жёстко. Он может включать солнечные энергетические системы, ядерные источники, накопители энергии, распределённые энергетические модули или комбинированные решения. Внутренняя часть главного пояса астероидов находится дальше от Солнца, чем Земля, поэтому солнечная энергетика там требует большей площади или более эффективных систем по сравнению с околоземной областью. Это не делает её невозможной, но повышает требования к площади, ориентации, долговечности и обслуживанию энергетических модулей.

Энергетический блок должен оцениваться не по максимальной пиковой мощности, а по способности поддерживать повторяемый производственный цикл. Для узла важны следующие задачи:

- обеспечение работы добывающих и подающих устройств;
- питание измельчения и классификации вещества;
- питание систем накопления, упаковки и дозированной подачи;
- зарядка или обслуживание транспортных и дозирующих аппаратов;
- обеспечение связи, навигации, мониторинга и управления;
- поддержка ремонтных и диагностических операций.

Поэтому энергетический блок является одним из ограничителей масштаба всей системы. Если энергии хватает только на единичные операции, узел не становится инфраструктурой. Если энергия обеспечивает повторяемые циклы, появляется возможность постепенно формировать и обслуживать дисперсную структуру.

Добывающе-подающий блок

Добывающе-подающий блок предназначен для получения вещества из сырьевого малого тела или сырьевого участка и передачи его в перерабатывающую часть узла. Его задача состоит не только в механическом отделении материала, но и в контроле процесса так, чтобы вещество не разлеталось неконтролируемо, не загрязняло критические элементы оборудования и могло быть направлено в последующую переработку.

Работа с малым телом отличается от земной добычи. Слабая гравитация уменьшает энергетическую цену перемещения вещества, но одновременно усложняет закрепление аппаратов, удержание инструмента, реакцию на усилия, локализацию пыли и контроль выброса материала. Поэтому добывающе-подающий блок должен решать две задачи одновременно: извлекать вещество и не терять управление над этим веществом в процессе извлечения.

В минимальном варианте добывающе-подающий блок может включать:

- устройство контакта с поверхностью или фрагментом вещества;
- механизм отделения, рыхления или захвата материала;
- систему первичного удержания и ограничения разлёта частиц;
- канал подачи вещества в перерабатывающий блок;
- датчики массы, состава, пылевой активности и состояния рабочей зоны.

Добывающе-подающий блок не обязан сразу обеспечивать крупномасштабную промышленную добычу в земном смысле. Для первого сценария важнее другое: он должен стабильно подавать вещество в переработку с такой скоростью, которая совместима с формированием первого участка структуры. Если производительность низкая, участок может формироваться слишком долго. Если подача нестабильна, перерабатывающий блок не сможет выдавать воспроизводимую рабочую фракцию.

Блок переработки, измельчения и фракционирования

Блок переработки, измельчения и фракционирования является одним из центральных элементов производственно-логистического узла. Его задача состоит не в том, чтобы просто раздробить вещество до состояния “пыли”, а в том, чтобы получить воспроизводимую рабочую фракцию, соответствующую физическому режиму структуры, заданному в теоретической части работы.

Для первого расчётного сценария важно не просто получить дисперсное вещество, а обеспечить доминирование заданного размерного диапазона, ограничить долю нежелательной мелкой компоненты, исключить опасные крупные включения и контролировать морфологию частиц. В настоящей версии рабочий инженерный диапазон рассматривается как область порядка 10–100 мкм, а для первого практического сценария может выделяться более узкая целевая область порядка 50–70 мкм. Такое сужение диапазона не является требованием к окончательной зрелой системе, но повышает предсказуемость первого опыта: уменьшается зависимость от поведения субмикронной пыли, зарядовых эффектов и неконтролируемой мелкой фракции.

Это особенно важно, потому что требуемый диапазон частиц не является произвольным технологическим параметром. Размер частиц влияет на эффективное сечение взаимодействия, длину свободного пробега, концентрацию, частоту столкновений, тепловую и эрозионную нагрузку на аппарат, радиационную долговечность, зарядовые эффекты и способность среды сохранять фазовую

согласованность. Следовательно, качество фракционирования определяет не только производительность узла, но и допустимость самой среды движения.

В теоретической части работы рабочий диапазон задаётся не как один абсолютный размер частицы, а как допустимая область. Для практической части может быть выбран более узкий расчётный диапазон, но в функциональном составе узла важно зафиксировать общее требование: оборудование должно не только измельчать материал, но и стабильно отделять рабочую фракцию от слишком крупной, слишком мелкой и нерабочей компоненты.

Слишком крупная фракция опасна для аппарата: она повышает энергию единичного столкновения, усиливает эрозионную и тепловую нагрузку и может превращать среду из управляемой в повреждающую. Слишком мелкая фракция также нежелательна: она сильнее подвержена радиационному давлению, эффекту Пойнтинга-Робертсона, зарядовым и плазменным процессам, а также может быстрее терять орбитальную согласованность. Поэтому блок фракционирования должен не только выделять полезный диапазон, но и отбраковывать обе крайности.

При этом получение рабочей фракции не должно оцениваться только по факту наличия нужных частиц. Важна стабильность выдачи от цикла к циклу. Если фракционный состав существенно меняется, то параметры структуры также становятся нестабильными: меняется концентрация, длина свободного пробега, частота столкновений, нагрузка на аппарат и срок деградации. Поэтому производственно-логистический узел должен обеспечивать не разовый выход нужной фракции, а воспроизводимость результата переработки.

Подготовка рабочей фракции должна включать не только измельчение и сортировку, но и проверку того, как частицы ведут себя при хранении, упаковке, подаче, контакте друг с другом, высвобождении и движении в разреженной среде. Поэтому блок фракционирования является не вспомогательным элементом узла, а одним из ключевых модулей экспериментальной проверки всей концепции.

На уровне функционального состава это означает, что блок переработки должен включать несколько операций:

- первичное измельчение или разрушение материала;
- отделение опасной крупной фракции;
- выделение рабочей фракции;
- ограничение мелкой побочной фракции;
- возврат неподходящего материала в переработку или его перевод в иной функциональный поток;
- контроль размерного состава;
- подтверждение стабильности выдачи от цикла к циклу.

Такое описание не означает, что в настоящей работе уже выбран конкретный тип мельницы, классификатора, сепаратора или сортировочного устройства. Наоборот, конкретная конструкция относится к следующему инженерному уровню. В настоящей работе важно зафиксировать минимальную функцию: производственно-логистический узел должен выдавать такую фракцию, которая делает возможным физический режим структуры, а не просто создавать неопределённую массу пыли.

Блок доводки формы частиц

После измельчения и фракционирования может потребоваться дополнительная доводка формы частиц. Этот блок не является обязательным для всех возможных вариантов орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры, но для первого рабочего сценария он имеет существенное значение, поскольку форма частиц влияет не только на взаимодействие с аппаратом, но и на накопление, упаковку, подачу и износ оборудования.

Механическое дробление минерального вещества обычно создаёт частицы неправильной формы: с острыми краями, неровностями, микротрещинами и шероховатой поверхностью. Такая фракция может повышать эрозионную нагрузку на аппарат, ускорять износ накопителей и каналов подачи, ухудшать воспроизводимость дозированного высвобождения и увеличивать риск повреждения гибких или полугибких элементов упаковки.

Поэтому в производственно-логистическом узле должна быть предусмотрена не только операция выделения нужного размерного диапазона, но и возможность снижения доли чрезмерно остроугольных, хрупких или нестабильных частиц. Речь не идёт о получении идеальных сфер. Достаточно уменьшить долю частиц с наиболее опасной морфологией и сделать фракцию более предсказуемой по взаимодействию с аппаратом и оборудованием.

В качестве технологических аналогов могут рассматриваться абразивно-струйные, жидкостно-абразивные, виброабразивные, галтовочные или иные методы округления и сглаживания фракции. В земных условиях такие подходы относятся к широкому классу технологий доводки, обработки и изменения поверхностных свойств гранул, порошков или мелких минеральных частиц. В космическом исполнении они должны быть замкнутыми, автономными и адаптированными к вакууму, малой гравитации, запылённости и ограниченному обслуживанию.

Важно подчеркнуть, что такой блок не увеличивает принципиально число функций узла, а уточняет уже необходимую функцию переработки. Если вещество всё равно должно измельчаться, сортироваться и подаваться в накопители, то контроль морфологии частиц является продолжением той же технологической цепочки. Его задача состоит в снижении вторичных рисков: износа упаковки, нестабильной подачи, чрезмерной эрозии аппарата и непредсказуемого поведения фракции при высвобождении.

Даже при наличии доводки формы частиц реальная рабочая фракция не будет абсолютно моноразмерной и идеально однородной. Частицы будут контактировать между собой при накоплении, упаковке, транспортировке, подаче и первых этапах высвобождения. Часть вещества может дополнительно дробиться, давать более мелкую побочную фракцию или изменять форму. Поэтому задача производственно-логистического узла состоит не в создании идеального порошка, а в поддержании доминирования рабочей фракции и ограничении доли нежелательной мелкой или опасной крупной компоненты.

Блок накопления и временного хранения

После получения рабочей фракции вещество должно быть временно накоплено и подготовлено к передаче аппаратам-носителям или дозирующим аппаратам. Этот блок необходим потому, что добыча, переработка и транспортировка не обязаны происходить с одинаковой скоростью. Перерабатывающий блок может работать непрерывно или сериями, а аппараты-носители могут прибывать к загрузке циклически. Между этими процессами требуется буфер.

Накопление вещества не следует понимать как хранение в одном крупном резервуаре. Для первого рабочего сценария более реалистичной является распределённая система локальных накопителей, кассет, контейнеров, гибких или полугибких оболочек, внешних грузовых блоков и промежуточных буферов. Их задача состоит в том, чтобы удерживать подготовленную фракцию, предотвращать её неконтролируемый разлёт, обеспечивать дозированную подачу и позволять передавать вещество транспортным аппаратам без постоянного участия Земли.

Гибкие или полугибкие накопители не должны рассматриваться как долговечные капитальные сооружения, обязанные сохранять свойства десятилетиями. В первом рабочем сценарии они являются расходными или полурасходными элементами производственно-логистического цикла. Их функция состоит во временном удержании, дозировании и передаче подготовленной фракции между переработкой, хранением и аппаратами-носителями.

Для таких накопителей радиационная стойкость важна, но не обязательно является единственным или главным ограничением. При контакте с минеральной фракцией, имеющей неровности и абразивные свойства, существенным фактором становится механический износ: истирание, проколы, повреждения при загрузке, разгрузке, креплении, транспортировке и повторном использовании. Поэтому накопители должны проектироваться как заменяемые элементы. Часть из них может быть одноразовой, часть — использоваться несколько циклов, часть — ремонтироваться или изготавливаться локально.

Такой подход снижает требование к “вечности” упаковки. Если накопитель является расходным элементом, его срок службы может измеряться не десятилетиями, а числом циклов загрузки, транспортировки и разгрузки. В таком режиме радиационная стойкость, абразивная прочность, ремонтпригодность и возможность локального изготовления должны рассматриваться совместно. Критическим становится не то, чтобы каждый накопитель служил весь срок существования структуры, а то, чтобы производственно-логистический узел мог планомерно заменять, ремонтировать или воспроизводить эти элементы.

Блок упаковки и передачи вещества аппаратам

Упаковка в настоящей работе понимается не как бытовой контейнер, а как временная система удержания и управляемой передачи массы. Вещество должно быть не просто собрано, но и подготовлено к присоединению к аппарату-носителю, удержанию во время манёвра, защите от неконтролируемого выброса, совместимости с двигательной установкой и последующему дозированному высвобождению.

Для первого рабочего сценария особенно важно, что объёмы вещества несопоставимы с внутренним объёмом обычного аппарата. Поэтому полезная масса рабочей фракции должна рассматриваться не как содержимое внутреннего бака аппарата, а как внешняя или полуинтегрированная грузовая система: кассета, контейнер, гибкий накопитель, прикрепляемый блок, распределённая оболочка или иной временный модуль удержания вещества.

Такой подход позволяет не проектировать аппарат-носитель как гигантский резервуар. Аппарат должен иметь возможность взять, удержать, переместить и дозированно высвободить рабочую массу, но сама масса может размещаться во внешнем грузовом элементе. В этом случае аппарат-носитель выполняет функцию тяги, навигации, ориентации, крепления, дозирования и контроля, а упаковка выполняет функцию временного удержания вещества.

При этом упаковка должна удовлетворять нескольким требованиям:

- удерживать подготовленную фракцию в условиях малой гравитации и манёвров;
- не разрушаться при контакте с абразивной минеральной фракцией;
- не давать значительного неконтролируемого выброса вещества;
- быть совместимой с системой дозированной подачи;
- выдерживать транспортировку к участку формирования структуры;
- не мешать работе двигателей, датчиков и систем ориентации;
- по возможности быть заменяемой, ремонтируемой или локально воспроизводимой.

Именно поэтому упаковка является частью производственного цикла, а не второстепенным аксессуаром. Если упаковка доставляется с Земли для каждого цикла, инфраструктурный смысл схемы резко ослабляется. Если же упаковка создаётся, ремонтируется или хотя бы частично воспроизводится в области работ, то затраты с Земли смещаются с постоянной доставки расходной массы на доставку оборудования и заменяемых высокотехнологических узлов.

Транспортно-дозирующие аппараты

После подготовки и упаковки вещества требуется доставить его к участку формирования структуры и высвободить в расчётном режиме. Эту функцию выполняют аппараты-носители, аппараты-дозаторы или комбинированные транспортно-дозирующие аппараты.

В настоящей работе не требуется жёстко разделять эти классы. Один аппарат может одновременно выполнять функции транспортировки, дозированного высвобождения, мониторинга и частичной коррекции распределения. В других схемах транспортный аппарат может доставлять грузовой блок к рабочему участку, а отдельный дозатор — выполнять высвобождение. Для теоретического описания важно не конкретное разделение аппаратов, а наличие функций: доставка, ориентация, дозирование, контроль и возврат.

Транспортно-дозирующий аппарат должен выполнять несколько операций:

- принять подготовленную массу вещества;
- удержать её на этапе выхода к рабочему участку;
- обеспечить ориентацию относительно расчётной траектории;
- высвободить вещество с заданной скоростью, направлением и распределением;
- измерить или передать данные о фактическом высвобождении;
- уйти с рабочего участка;
- вернуться к зоне загрузки, дозаправки, проверки или обслуживания.

Важнейшее отличие такой схемы от одноразового распыления состоит в повторяемости. Аппараты не должны рассматриваться как расходные носители, теряемые после одного прохода. Для инфраструктурного сценария они должны выполнять множество рабочих циклов. Именно это позволяет распределить капитальные затраты на аппараты по большому числу операций и уменьшить зависимость от запусков с Земли.

При этом транспортно-дозирующие аппараты могут выполнять и смежные функции. Они могут участвовать в мониторинге структуры, проверять концентрацию частиц,

фиксировать фазовый разброс, выполнять коррекционные проходы, вносить дополнительное вещество в зоны падения концентрации и участвовать в уточнении профиля структуры. Поэтому аппаратная система не обязательно должна состоять из большого числа специализированных машин: часть функций может быть совмещена в долговечных многоцелевых аппаратах.

Блок мониторинга и измерения параметров структуры

Формирование орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры невозможно без измерения её фактического состояния. Недостаточно высвободить рассчитанную массу вещества: необходимо подтвердить, что оно распределилось в допустимом диапазоне концентрации, размерного состава, фазовой согласованности и векторного направления.

Блок мониторинга должен решать следующие задачи:

- измерять распределение концентрации частиц;
- контролировать размерный состав рабочей фракции;
- фиксировать наличие опасной крупной или нежелательной мелкой компоненты;
- оценивать фазовый и поперечный разброс скоростей;
- контролировать векторную согласованность частиц;
- выявлять зоны с недостаточной или избыточной концентрацией;
- оценивать последствия проходов аппаратов через структуру;
- передавать данные для коррекции и обслуживания.

Мониторинг может выполняться отдельными аппаратами, датчиками на транспортно-дозирующих аппаратах, разнесёнными наблюдательными платформами, оптическими, радиометрическими, ударными, электростатическими или иными средствами. Конкретный состав датчиков в настоящей работе не выбирается. Важно лишь то, что без мониторинга структура остаётся неконтролируемым распределением вещества, а не инфраструктурной средой движения.

Мониторинг также необходим для перехода от базового режима к улучшенному. В базовом режиме структура выводится в допустимый рабочий диапазон. В улучшенном режиме после начального формирования выполняются дополнительные измерения и коррекционные проходы, снижающие поперечный разброс скоростей, уточняющие входную, рабочую и выходную зоны и увеличивающие срок сохранения рабочего профиля. Поэтому мониторинг является не только системой безопасности, но и средством повышения долговечности участка.

Отдельно следует учитывать, что мониторинг должен оценивать не только геометрию сформированного распределения, но и долю вещества, реально вошедшего в рабочий профиль. Для этого в дальнейшей практической части вводится коэффициент рабочего включения:

$$\eta_{\text{work}} = M_{\text{work}} / M_{\text{release}}$$

где:

- η_{work} (working fraction efficiency) — коэффициент формирования рабочего профиля;
- M_{work} (working-profile mass) — масса вещества, фактически вошедшая в рабочий профиль с допустимой концентрацией, размерным составом, фазовой и векторной согласованностью;

- M_{release} (released mass) — полная масса вещества, высвобождённого в процессе формирования структуры.

Параметр η_{work} показывает, какая доля высвобождённого вещества фактически становится частью рабочего профиля структуры. Его значение зависит от точности подачи вещества, характеристик фракции, параметров орбитальной области и степени сохранения фазовой и векторной согласованности частиц. Для реальной системы η_{work} обычно меньше единицы, поскольку часть вещества может не войти в рабочий профиль либо выйти из него в процессе формирования структуры.

С точки зрения функционального состава узла это означает, что система должна включать не только блоки добычи, переработки и подачи, но и средства измерения результата. Без такой обратной связи невозможно отличить успешное формирование структуры от простого выброса дисперсного материала в пространство.

Блок обслуживания и коррекции

Любая дисперсная структура будет деградировать: часть вещества уйдёт из рабочего диапазона, часть распределения расплывётся, часть профиля нарушится после проходов аппаратов, а часть параметров изменится под действием внешних факторов. Поэтому производственно-логистический узел должен включать не только средства формирования, но и средства обслуживания.

Обслуживание не означает повторное строительство структуры с нуля. Оно означает восстановление рабочего профиля: локальное досыпание вещества, коррекцию входной или выходной зоны, восстановление концентрации, уточнение фазового и векторного распределения, компенсацию последствий проходов аппаратов и удаление или разбавление опасных участков.

В функциональном составе узла обслуживание может обеспечиваться теми же транспортно-дозирующими аппаратами, которые участвовали в формировании структуры. Это важно для снижения общего числа подсистем: отдельный “ремонтный флот” не обязательно требуется на первом этапе. Долговечные аппараты могут выполнять как первичное внесение вещества, так и последующие коррекционные операции, если их ресурс, навигация, система дозирования и мониторинг позволяют это делать.

Таким образом, блок обслуживания является не дополнительной роскошью, а условием превращения структуры в инфраструктуру. Разовое высвобождение вещества создаёт распределение. Обслуживание превращает это распределение в работающий объект, параметры которого могут поддерживаться, измеряться и возвращаться в допустимый диапазон.

Блок управления, связи и автономности

Производственно-логистический узел в области главного пояса астероидов не может работать как система постоянного ручного управления с Земли. Задержка связи, расстояние, длительность циклов и необходимость быстрого реагирования на локальные отклонения требуют высокого уровня автономности.

Блок управления должен обеспечивать:

- планирование рабочих циклов;
- координацию добычи, переработки, накопления и транспортировки;
- распределение энергии между подсистемами;
- диагностику состояния оборудования;

- управление аппаратами-носителями и дозаторами;
- принятие решений о коррекции структуры;
- переход в безопасные режимы при отказах;
- передачу отчётных данных на Землю или в управляющий центр.

В настоящей работе автономность не означает полную независимость от человека. На раннем этапе человек может задавать стратегические параметры, цели, допустимые диапазоны и режимы работы. Автоматические системы должны выполнять локальные операции, мониторинг, диагностику и коррекцию в пределах заданных ограничений. Такой режим ближе к автономной промышленной системе с периодическим контролем, чем к ручному телеуправлению каждым действием.

Минимальный функциональный состав узла

Сводно минимальный производственно-логистический узел для первого рабочего сценария должен включать:

- базовую зону размещения оборудования;
- энергетический блок;
- добывающе-подающий блок;
- блок переработки, измельчения и фракционирования;
- блок доводки формы частиц, если морфология фракции влияет на эрозию, упаковку и дозирование;
- систему накопления и временного хранения;
- систему упаковки и передачи вещества аппаратам;
- транспортно-дозирующие аппараты;
- систему мониторинга параметров структуры;
- систему обслуживания и коррекции;
- систему управления, связи и автономности.

Этот перечень может выглядеть обширным, но по сути он описывает не множество независимых проектов, а одну повторяемую производственно-логистическую цепочку. Часть функций может совмещаться в одном аппарате или модуле. Например, транспортно-дозирующий аппарат может одновременно выполнять мониторинг и коррекционные проходы; энергетический блок может быть распределён между несколькими платформами; накопление и упаковка могут быть объединены в сменных внешних грузовых блоках; система обслуживания может использовать те же аппараты, что и система формирования структуры.

Поэтому функциональный состав узла не должен восприниматься как избыточная фантастическая фабрика. Это минимальный набор функций, без которых практический сценарий не может перейти от идеи к проверяемой инфраструктурной задаче. Если убрать переработку, не будет рабочей фракции. Если убрать накопление и упаковку, вещество нельзя будет передавать аппаратам. Если убрать дозирование, структура станет неконтролируемым облаком. Если убрать мониторинг, нельзя будет подтвердить рабочий режим. Если убрать обслуживание, структура быстро перейдёт из инфраструктуры в разовое распределение вещества.

Этот функциональный состав одновременно задаёт программу экспериментальной проверки. На первом этапе отдельные функции могут быть реализованы в

упрощённом виде: рабочая фракция может быть подготовлена заранее, высвобождение может осуществляться ограниченной выпускной системой, а диагностика может проверять только короткий участок и ограниченное число параметров. Однако даже в таком упрощённом варианте должна сохраняться логика полного цикла: подготовка вещества — подача — измерение результата — коррекция.

На следующем этапе проверяется устойчивость рабочего профиля, затем обслуживание и повторное использование, и только после этого — переход к развитому производственно-логистическому узлу в области малых тел. Такое поэтапное построение не ослабляет постановку, а задаёт проверяемую траекторию перехода от концепции к проектированию.

Таким образом, производственно-логистический узел является материальным и операционным основанием формирования структуры. Его задача состоит не в том, чтобы быть универсальной космической фабрикой, а в том, чтобы обеспечить ограниченную, но повторяемую цепочку: локальное вещество — переработка — фракционирование — накопление — упаковка — доставка — дозированное высвобождение — измерение — коррекция — повторение цикла. Именно эта цепочка позволяет рассматривать орбитально-ориентированную протяжённую дисперсную структуру как инфраструктурный объект, а не как одноразовый выброс вещества.

Следующий вопрос состоит в том, как эти функции соединяются во времени. Поэтому дальнейшее рассмотрение должно перейти от состава узла к его операционному циклу: последовательности действий, через которые исходное вещество превращается в рабочий профиль орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры.

16. Операционный цикл формирования структуры

После определения функционального состава производственно-логистического узла необходимо описать, как его элементы работают во времени. Узел не формирует орбитально-ориентированную протяжённую дисперсную структуру одной операцией. Его работа представляет собой последовательность повторяемых циклов, в которых локальное вещество извлекается, перерабатывается, фракционируется, упаковывается, доставляется к рабочему участку, дозированно высвобождается, а затем параметры структуры измеряются и при необходимости корректируются.

Операционный цикл важен потому, что именно он отличает инфраструктурную схему от одноразовой миссии. В одноразовой логике аппарат доставляет ограниченную массу вещества, выполняет одну операцию и завершает работу. В инфраструктурной логике аппаратная система возвращается к загрузке, обслуживанию или коррекции орбиты и многократно повторяет рабочие проходы. Поэтому реализуемость структуры зависит не только от массы вещества или мощности оборудования, но и от способности производственно-логистического узла организовать устойчивую последовательность циклов.

В общем виде операционный цикл можно представить как следующую цепочку:

- выбор и подготовка локального источника вещества;
- извлечение или сбор материала;

- переработка и фракционирование;
- накопление рабочей фракции;
- упаковка или присоединение вещества к аппарату-носителю;
- выход аппарата на рабочую орбитальную конфигурацию;
- доставка вещества к участку формирования структуры;
- дозированное высвобождение вещества вдоль расчётной траектории;
- измерение параметров созданного распределения;
- оценка доли вещества, вошедшего в рабочий профиль;
- коррекция, пополнение или повторный проход;
- возврат аппарата к зоне загрузки или обслуживания;
- подготовка к следующему циклу.

Первый этап связан с выбором локального источника вещества. На этом уровне производственно-логистический узел определяет, какой объект или участок вещества используется в данном цикле: базовое малое тело, сырьевой участок, фрагментированный материал, реголитовая зона или предварительно подготовленная масса. Важно, что выбор источника должен учитывать не только наличие вещества, но и его пригодность для получения нужной фракции, безопасность извлечения и энергетическую цену перемещения материала.

Второй этап — извлечение или сбор материала. В настоящей работе не конкретизируется способ добычи: это может быть механическое отделение, захват рыхлого реголита, фрагментация, поверхностный сбор или иной способ, пригодный для конкретного малого тела. Существенно другое: материал должен быть получен контролируемыми партиями, чтобы не создавать неконтролируемого разлёта вещества и не нарушать устойчивость базовой зоны. Поэтому операция извлечения должна быть связана с удержанием материала и его передачей в перерабатывающий блок.

Третий этап — переработка и фракционирование. Полученное вещество переводится в состояние, пригодное для дальнейшего использования. Для формирования дисперсной структуры особенно важна рабочая фракция заданного размерного диапазона. Поэтому переработка должна включать не только измельчение, но и разделение материала по размеру, исключение опасных крупных частиц, отделение нерабочей мелкой компоненты и повторную переработку части материала при необходимости. На этом этапе вещество начинает разделяться на функциональные потоки: рабочую фракцию для структуры, материал для топлива или рабочего тела, защитную массу, упаковочные компоненты, конструкционные и потенциально ценные фракции.

Четвёртый этап — накопление рабочей фракции. Дисперсная структура не создаётся непрерывно из потока переработки в реальном времени. Вещество должно накапливаться до массы, достаточной для конкретного рабочего цикла. Это позволяет согласовать производительность переработки с графиком транспортных и дозирующих аппаратов. Накопление также создаёт буфер между добычей и формированием структуры: даже если переработка идёт неравномерно, аппараты могут получать подготовленную массу в более стабильном режиме.

Пятый этап — упаковка или присоединение вещества к аппарату-носителю. Для рассматриваемых объёмов рабочей фракции аппарат не должен пониматься как

внутренний контейнер. Более естественной является схема, в которой аппарат выступает как тягово-управляющая система, перемещающая внешнюю, присоединённую или сопровождаемую массу вещества. Поэтому перед рабочим проходом подготовленная фракция должна быть удержана в форме, пригодной для транспортировки: в гибкой оболочке, кассете, внешнем грузовом блоке, композитном накопителе, связанном пакете вещества или иной системе временного удержания.

Шестой этап — выход аппарата на рабочую орбитальную конфигурацию. Аппарат-носитель или аппарат-дозатор должен перейти от зоны загрузки к траектории, на которой будет происходить высвобождение вещества. Этот переход не обязательно происходит внутри уже сформированной структуры. Он может выполняться средствами обычной орбитальной механики: коррекциями скорости, переходами между близкими орбитами, гомановскими или близкими к ним траекторными участками. Поэтому операционный цикл включает не только активное высвобождение вещества, но и значительную часть обычной транспортной динамики.

Седьмой этап — доставка вещества к участку формирования структуры. На этом этапе аппарат перемещает рабочую массу к зоне, где вещество должно быть высвобождено. Здесь важны тяга аппарата, устойчивость упаковки, сохранность полезной массы, расход рабочего тела, точность выхода на расчётную траекторию и способность аппарата работать с внешним грузовым блоком. Если упаковка не сохраняет вещество или аппарат не способен стабильно переместить внешнюю массу, рабочий цикл теряет эффективность ещё до начала высвобождения.

Восьмой этап — дозированное высвобождение вещества вдоль расчётной траектории. Это центральная операция формирования структуры. Вещество не выбрасывается одномоментно, а распределяется порциями вдоль протяжённого участка движения. Скорость выдачи, направление высвобождения, относительная скорость аппарата и частиц, фазовый разброс, концентрация и размерный состав должны согласовываться с расчётным режимом среды. Один проход может формировать только частичный слой или профиль распределения; поэтому полноценный рабочий участок создаётся серией проходов.

Девятый этап — измерение параметров созданного распределения. После высвобождения вещества необходимо определить, соответствует ли сформированная область требуемым параметрам: концентрации, размерному составу, фазовой согласованности, векторному направлению движения частиц, длине свободного пробега и допустимому диапазону взаимодействия с аппаратом. Без этого этапа невозможно отличить управляемую дисперсную структуру от неопределённого распределения вещества.

Десятый этап — оценка доли вещества, вошедшего в рабочий профиль. Для структуры важно не только то, сколько вещества было высвобождено, но и то, какая его часть действительно оказалась в заданном рабочем коридоре с допустимой концентрацией, размерным составом, фазовой и векторной согласованностью. Часть вещества может уйти за пределы профиля, войти в нежелательную фракцию, создать зоны перенасыщения, рассеяться или потребовать повторной коррекции. Поэтому операционный цикл должен включать диагностику рабочего включения вещества, а не только учёт массы, выпущенной из аппарата.

Одиннадцатый этап — коррекция, пополнение или повторный проход. Если измерения показывают отклонение от рабочего диапазона, производственно-логистический узел должен выполнить дополнительный проход, изменить

дозировку, добавить вещество, скорректировать распределение или компенсировать локальные потери. Поэтому структура формируется не как статическая форма, а как режим, доводимый до рабочих параметров серией действий.

Двенадцатый этап — уход аппарата с участка формирования и возврат к зоне загрузки или обслуживания. После высвобождения вещества аппарат должен перейти на траекторию возврата, коррекции или обслуживания. Этот этап может занимать значительную часть полного цикла. В зависимости от орбитальной конфигурации возврат может выполняться по баллистической или корректируемой траектории, включая гомановские или близкие к ним переходы. Поэтому ресурс аппарата должен оцениваться не по числу актов высвобождения вещества, а по числу полных циклов: загрузка — выход на рабочую траекторию — высвобождение — измерение результата — коррекция — возврат — обслуживание.

Тринадцатый этап — подготовка к следующему циклу. Аппарат проходит проверку, дозаправку, ремонт, замену расходных элементов, присоединение новой рабочей массы или коррекцию программного режима. Если узел способен выполнять такие операции локально, каждый следующий цикл требует меньше внешнего вмешательства. Если же для каждого цикла требуется новая доставка аппарата с Земли, система теряет инфраструктурный смысл.

Такой операционный цикл показывает, что формирование структуры является не актом разового распыления, а повторяемым производственно-транспортным процессом. Его длительность определяется не только временем прохождения рабочего участка, но и временем переработки вещества, накопления, упаковки, выхода на траекторию, возврата аппарата, обслуживания и подготовки к следующему проходу.

Особое значение имеет постепенное накопление инфраструктурного эффекта. Первые проходы аппаратов формируют начальное распределение вещества в ещё не подготовленной области. После появления минимального рабочего профиля последующие аппараты могут проходить через уже более определённую среду. Если начальный участок снижает чувствительность к отклонениям, облегчает стабилизацию или задаёт более предсказуемый коридор движения, он начинает помогать собственному расширению и уточнению. В этом смысле структура может формироваться по нарастающей схеме: первые циклы создают основу, последующие циклы используют уже созданную часть как элемент маршрута.

На начальном этапе такой эффект не должен пониматься как полностью автономное самостроительство структуры. Каждый этап ещё остаётся управляемым: вещество должно быть подготовлено, доставлено, высвобождено, измерено и при необходимости скорректировано. Однако именно в этом направлении должна развиваться инфраструктурная логика производственно-логистического узла: от управляемых повторяемых циклов — к всё более автономному формированию, расширению и обслуживанию структуры. Уже сформированный участок может уменьшать неопределённость последующих проходов, повышать повторяемость операций и снижать объём внешнего управления. Поэтому конечной инженерной целью является не разовая сборка структуры, а рост автономности, автоматизации и способности узла постепенно формировать новые участки с меньшими внешними затратами.

Операционный цикл также показывает, почему долговечность аппаратов имеет ключевое значение. Если аппарат способен выполнить только один проход, то формирование структуры превращается в серию одноразовых миссий. Если же

аппарат способен многократно проходить цикл загрузки, доставки, высвобождения, измерения, коррекции, возврата и обслуживания, то стоимость и сложность каждого следующего прохода снижаются. В этом случае основной вклад переносится на создание долговечной аппаратной системы, а не на постоянную замену одноразовых средств.

Таким образом, операционный цикл производственно-логистического узла связывает физическое описание дисперсной структуры с реальной последовательностью действий. Он показывает, что для формирования структуры недостаточно иметь вещество и аппарат-распылитель. Необходима повторяемая цепочка:

добыча — переработка — фракционирование — накопление — упаковка — транспортировка — высвобождение — измерение — оценка рабочего включения — коррекция — возврат — обслуживание.

Именно эта цепочка делает возможным переход от единичного выброса вещества к созданию управляемой инфраструктурной среды движения.

17. Базовые расчётные критерии производственно-логистического узла

После определения функционального состава и операционного цикла производственно-логистического узла необходимо задать минимальные расчётные критерии, по которым может оцениваться его достаточность для формирования и обслуживания орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры. На данном этапе речь не идёт о полном проектировании промышленного комплекса, выборе конкретного астероида, типа двигателя, способа добычи или энергетической установки. Задача настоящей главы состоит в другом: определить систему базовых соотношений, без которых невозможно перейти от общей идеи узла к расчётному описанию.

Производственно-логистический узел должен оцениваться не по одной характеристике. Его достаточность определяется системой связанных критериев:

- массовым балансом локального вещества;
- масштабом переработки;
- скоростью подачи сырья к перерабатывающему блоку;
- производительностью переработки;
- способностью получать рабочую фракцию заданного размерного диапазона;
- долей переработанного вещества, переходящей в рабочую фракцию;
- долей высвобождённого вещества, реально входящей в рабочий профиль;
- эффективностью упаковки, удержания и доставки вещества;
- массой, вносимой за один рабочий цикл;
- тяговой реализуемостью цикла;
- числом рабочих циклов;
- временем формирования участка структуры;
- соотношением времени формирования и времени деградации;

- ресурсом транспортно-дозировочных аппаратов;
- возможностью обслуживания, пополнения и восстановления рабочего профиля;
- достаточной интенсивностью будущего использования структуры.

Эти критерии важны потому, что слабое место может находиться не в физике самой дисперсной среды, а в производственно-логистической цепочке. Вещества может быть достаточно, но масштаб переработки может оказаться недостаточным; рабочая фракция может быть получена, но не в нужном объёме и не в нужный срок; вещество может быть подготовлено и доставлено, но лишь малая его доля может войти в рабочий профиль; структура может быть создана, но её обслуживание может оказаться тяжелее допустимого эксплуатационного режима; инфраструктура может быть технически работоспособной, но преждевременной по отношению к числу аппаратов, которые способны её использовать.

Поэтому расчётные критерии должны учитывать не только физику дисперсной среды, но и масштаб производственного процесса, темп строительства, ресурс аппаратов, коэффициент рабочего включения вещества, возможность обслуживания и реальную интенсивность будущей эксплуатации.

Массовый баланс локального вещества

Первым критерием является массовый баланс. Выбранная область должна содержать достаточное количество вещества не только для первичного формирования структуры, но и для её обслуживания, пополнения, создания резерва и сопутствующих функций производственно-логистического узла.

В общем виде:

$$M_{\text{available}} \geq M_{\text{struct}} + M_{\text{service}} + M_{\text{reserve}}$$

где

$M_{\text{available}}$ (available mass)— масса локально доступного вещества, пригодного для переработки;

M_{struct} (structure mass) — масса вещества, необходимая для формирования рабочего участка дисперсной структуры;

M_{service} (service mass)— масса вещества, необходимая для обслуживания, пополнения и коррекции структуры;

M_{reserve} (reserve mass) — резерв вещества.

Если доступная масса меньше суммы рабочей массы, сервисной массы и резерва, выбранная область не может рассматриваться как достаточная база для долговечной инфраструктурной системы. При этом рабочая масса структуры не должна смешиваться с полной сырьевой массой: из исходного материала только часть переходит в рабочую фракцию, а из высвобожденной фракции только часть фактически входит в рабочий профиль.

Массовый баланс особенно важен потому, что производственно-логистический узел не должен зависеть от постоянной доставки основной массы вещества с Земли. Если для каждого нового участка структуры требуется привозить вещество извне, узел теряет свою инфраструктурную логику. Его смысл состоит в том, чтобы доставленные с Земли аппараты и производственные системы работали с местным материалом и многократно превращали его в разные функциональные потоки: рабочую фракцию для структуры, топливо, рабочее тело, защитную массу, упаковочные и расходные материалы.

Для более широкой оценки можно записать расширенный баланс:

$$M_{\text{available}} \geq M_{\text{struct}} + M_{\text{service}} + M_{\text{reserve}} + M_{\text{aux}}$$

где M_{aux} (auxiliary mass)— масса вещества, предназначенная для сопутствующих функций узла: топлива, рабочего тела, ремонта, защитной массы, упаковки, конструкционных элементов или иных операций.

Эта запись подчёркивает, что производственно-логистический узел не должен рассматриваться только как источник вещества для дисперсной структуры. Его ценность возрастает, если локальное вещество распределяется между несколькими функциональными потоками. В таком случае массовый баланс должен учитывать не только массу самой структуры, но и массу, необходимую для поддержания работы всей локальной инфраструктуры.

Масштаб переработки и темп получения рабочей массы

Вторым критерием является масштаб переработки. Наличие достаточного вещества не означает, что оно может быть использовано в нужном объёме и в нужный срок. Производственно-логистический узел должен иметь не просто перерабатывающий модуль, а систему, способную выдавать рабочую массу в масштабе, сопоставимом с задачей формирования и обслуживания структуры.

В общем виде это можно записать как:

$$Q_{\text{work}} \geq Q_{\text{required}}$$

где

Q_{work} (working-fraction production rate) — скорость получения рабочей фракции;

Q_{required} (required production rate) — требуемая скорость получения рабочей фракции для формирования и обслуживания структуры в заданные сроки.

Этот критерий показывает, что недостаточно принципиальной возможности измельчить или переработать вещество. Важно, чтобы производительность соответствовала масштабу проекта. Если Q_{work} мала, структура может быть физически возможной, но её формирование окажется слишком длительным, а обслуживание — несоразмерно тяжёлым. В таком случае узел будет демонстрировать технологическую возможность, но не инфраструктурную пригодность.

Для производственно-логистического узла масштаб переработки связан сразу с несколькими параметрами:

- массой первого рабочего участка;
- сроком его формирования;
- частотой рабочих циклов аппаратов;
- необходимым резервом вещества;
- темпом регулярного обслуживания;
- числом аппаратов, которые потенциально смогут использовать структуру.

Поэтому критерий $Q_{\text{work}} \geq Q_{\text{required}}$ должен пониматься не как отдельное требование к измельчителю или фракционирующему модулю, а как требование ко всему производственному темпу узла. Если узел строится как инфраструктура, его производительность должна быть согласована с тем, как быстро создаётся структура, как часто она используется и как быстро она требует пополнения.

Подача сырья к переработке

Третьим критерием является подача сырья к перерабатывающему блоку. Даже если перерабатывающий модуль обладает высокой производительностью, он не может работать быстрее, чем сырьё поступает к нему из сырьевого участка или сырьевого малого тела.

В общем виде:

$$Q_{\text{feed}} \geq Q_{\text{process}}$$

где Q_{feed} (feed rate) — скорость подачи сырья к перерабатывающему блоку; Q_{process} (processing rate) — производительность переработки.

Это условие показывает, что в расчётной схеме должен учитываться не только сам перерабатывающий модуль, но и вся цепочка доставки вещества к нему. Сырьё должно быть извлечено, удержано, перемещено, передано в перерабатывающий блок и подано в режиме, совместимом с его работой.

Если $Q_{\text{feed}} < Q_{\text{process}}$, перерабатывающее оборудование будет простаивать, а расчётная производительность узла окажется завышенной. Если же сырьё подаётся слишком быстро и не может быть переработано или накоплено, возникает проблема избытка необработанного материала. Поэтому подача сырья, переработка и накопление должны быть согласованы как единый производственный процесс.

В более сложных схемах доставка сырья к перерабатывающему узлу может включать направленное перемещение фрагментов вещества, транспортировку с сырьевого малого тела к базовому телу, использование промежуточных накопителей или другие способы организации потока вещества. Подробная схема таких операций относится к более детальной модели производственно-логистического узла. Однако сам критерий подачи сырья должен быть зафиксирован уже здесь: производительность узла определяется не только мощностью переработки, но и способностью обеспечить устойчивый поток материала к переработке.

Производительность переработки

Четвёртым критерием является производительность переработки. Наличие вещества и возможность его подачи к перерабатывающему блоку ещё не означают, что оно может быть переведено в пригодное состояние. Узел должен перерабатывать локальный материал в форму, из которой затем могут быть получены рабочая дисперсная фракция, топливо, рабочее тело, упаковочные материалы, защитная масса или иные функциональные потоки.

Масса переработанного вещества может быть выражена как:

$$M_{\text{processed}} = Q_{\text{process}} * T_{\text{process}}$$

где

$M_{\text{processed}}$ (processed mass) — масса переработанного вещества;

Q_{process} (processing rate) — производительность переработки;

T_{process} (processing time) — время работы перерабатывающего узла.

Это соотношение показывает, что практическая реализуемость зависит не только от массы выбранного малого тела, но и от мощности, ресурса и устойчивости перерабатывающего оборудования. Большой запас вещества не решает задачу, если узел не способен преобразовать его в рабочую фракцию в допустимое время.

Производительность переработки должна рассматриваться с учётом всего операционного цикла. Если перерабатывающий блок работает медленнее, чем

транспортные и дозирующие аппараты способны выполнять циклы, возникает простой транспортной системы. Если же переработка быстрее, чем накопление и доставка, требуется достаточный буфер хранения. Поэтому Q_{process} должно согласовываться с добычей, подачей сырья, накоплением, упаковкой, транспортировкой и числом рабочих циклов.

В этом смысле производительность переработки является не только техническим параметром оборудования, но и критерием согласованности всего узла. Недостаточно иметь мощный отдельный модуль; необходимо, чтобы его производительность была встроена в общую цепочку: источник вещества — подача сырья — переработка — фракционирование — накопление — транспортировка — высвобождение.

Получение рабочей фракции

Пятым критерием является способность получать рабочую фракцию заданного размерного диапазона. В физическом описании структуры размер частиц был определён как один из ключевых параметров режима среды. Поэтому производственный узел должен не просто измельчать вещество, а выдавать фракцию, соответствующую требуемому диапазону размеров, в нужном объёме и за допустимое время.

Масса рабочей фракции может быть записана как:

$$M_{\text{work}} = \eta_{\text{frac}} * M_{\text{processed}}$$

или через производительность:

$$Q_{\text{work}} = \eta_{\text{frac}} * Q_{\text{process}}$$

где

M_{work} (working-fraction mass) — масса вещества, соответствующая требуемому размерному диапазону;

Q_{work} (working-fraction production rate) — скорость получения рабочей фракции;

η_{frac} (fractionation efficiency) — коэффициент выхода рабочей фракции после измельчения, сортировки и фракционного контроля.

В этой записи η_{frac} характеризует не только свойства исходного материала, но и класс перерабатывающего оборудования. Для формирования структуры важно не просто разрушить или измельчить вещество, а получить заданный диапазон частиц в требуемом объёме и за допустимое время. Если оборудование не способно стабильно выдавать нужную фракцию, производственно-логистический узел не может обеспечить физический режим структуры, заданный в теоретической части работы.

Такой критерий связывает главу о производственно-логистическом узле с главой о физическом режиме дисперсной структуры. Требуемый диапазон частиц не является произвольным технологическим параметром: он влияет на сечение взаимодействия, длину свободного пробега, концентрацию, частоту столкновений, тепловую и эрозионную нагрузку. Поэтому качество фракционирования определяет не только производительность узла, но и допустимость самой среды движения.

При этом получение рабочей фракции должно оцениваться не только по факту наличия нужных частиц, но и по стабильности их выдачи. Если фракционный состав плавает от цикла к циклу, то параметры структуры также будут нестабильными. Поэтому для производственно-логистического узла важно не только среднее значение η_{frac} , но и воспроизводимость результата переработки. Рабочая фракция

должна быть достаточно стабильной, чтобы каждый следующий цикл высвобождения вещества не создавал непредсказуемое распределение частиц.

Коэффициент рабочего включения вещества

Шестым критерием является коэффициент рабочего включения вещества. Однако по своему значению он не является рядовым параметром производственно-логистической цепочки. Если коэффициент выхода рабочей фракции показывает, какая часть переработанного сырья стала подготовленным веществом нужного размерного диапазона, то коэффициент рабочего включения показывает, какая часть уже подготовленной и высвобожденной массы действительно стала частью рабочего профиля структуры.

Именно поэтому η_{work} связывает производственную часть узла с физическим существованием самой дисперсной структуры. До этого этапа вещество может быть добыто, переработано, фракционировано, упаковано, доставлено и высвобождено, но ещё не обязательно стало рабочей средой движения. Только та часть вещества, которая вошла в профиль с допустимой концентрацией, размерным составом, фазовой и векторной согласованностью, создаёт инфраструктурную функцию структуры.

Обозначим:

$$\eta_{\text{work}} = M_{\text{profile}} / M_{\text{release}}$$

где:

- η_{work} (working inclusion efficiency) — коэффициент рабочего включения вещества;
- M_{profile} (working-profile mass) — масса вещества, фактически вошедшая в рабочий профиль с допустимой концентрацией, размерным составом, фазовой и векторной согласованностью;
- M_{release} (released mass) — полная масса вещества, высвобождённая транспортно-дозирующими аппаратами.

Тогда:

$$M_{\text{profile}} = \eta_{\text{work}} * M_{\text{release}}$$

и:

$$M_{\text{release}} = M_{\text{profile}} / \eta_{\text{work}}$$

Этот коэффициент является одним из центральных параметров первого расчётного сценария. Если η_{work} близок к единице, большая часть высвобождённого вещества становится частью рабочего профиля. Если η_{work} снижается до 0,1, требуемая масса высвобождения возрастает в десять раз. Если η_{work} оказывается порядка 0,01, то для получения той же рабочей массы требуется уже в сто раз больше высвобождаемого вещества.

Следовательно, η_{work} определяет связь между массой подготовленной фракции, массой высвобождения и массой вещества, реально работающей в структуре. Поэтому производственно-логистический узел должен включать не только систему подачи вещества, но и систему диагностики рабочего включения: измерение фактической концентрации, фазового распределения, векторной согласованности, зон потерь и доли вещества, оставшейся вне рабочего профиля.

На уровне операционного цикла важно учитывать не только массу подготовленной фракции и не только массу высвобождения, но и массу вещества, которая действительно стала частью рабочего профиля. Именно эта величина определяет

число циклов формирования структуры, сроки её создания и требования к транспортно-дозировочным аппаратам.

Масса, входящая в рабочий профиль за один цикл

Седьмым критерием является масса вещества, которая не просто перевозится аппаратом и не просто высвобождается в выбранной области, а фактически входит в рабочий профиль структуры за один рабочий цикл. Для формирования протяжённой дисперсной структуры важно различать четыре уровня массы: подготовленную рабочую фракцию, массу, принятую аппаратом или внешним грузовым блоком, массу, доставленную и высвобожденную в зоне формирования, и массу, реально вошедшую в рабочий профиль.

Однако для формирования структуры важна не только масса, доставленная к зоне выпуска, а масса, реально вошедшая в рабочий профиль. Поэтому:

$$M_{\text{profile,cycle}} = M_{\text{release,cycle}} * \eta_{\text{work}}$$

или в развёрнутом виде:

$$M_{\text{profile,cycle}} = N_{\text{carriers}} * m_{\text{payload}} * \eta_{\text{pack}} * \eta_{\text{delivery}} * \eta_{\text{work}}$$

где:

- $M_{\text{profile,cycle}}$ (working-profile mass per cycle) — масса вещества, реально вошедшая в рабочий профиль за один рабочий цикл;
- $M_{\text{release,cycle}}$ (released mass per cycle) — масса вещества, высвобожденная в течение одного рабочего цикла;
- N_{carriers} (number of carriers) — число транспортно-дозировочных аппаратов, участвующих в цикле;
- m_{payload} (payload mass) — масса подготовленной рабочей фракции, переносимой одним аппаратом за цикл;
- η_{pack} (packing efficiency) — коэффициент эффективности упаковки и сохранения вещества до этапа доставки;
- η_{delivery} (delivery efficiency) — коэффициент сохранения полезной массы при транспортировке к участку формирования структуры;
- η_{work} (working inclusion efficiency) — коэффициент рабочего включения вещества в профиль структуры.

В этой записи m_{payload} не означает внутренний объём аппарата какместилище вещества. Для рассматриваемых объёмов рабочей фракции такой подход был бы нецелесообразен: аппарат не должен превращаться в большой контейнер для вещества. Под полезной массой здесь понимается вещество, которое аппаратная система способна взять в виде внешнего, присоединяемого или сопровождаемого грузового блока, удержать, транспортировать и дозированно высвободить.

Поэтому на величину $M_{\text{release,cycle}}$ влияет не только тяга аппарата, но и система внешней упаковки, крепления, временного удержания, устойчивость упаковки к внешним и внутренним возмущениям, защита от воздействия собственного двигателя и возможность создания расходных средств упаковки в области работ. Конкретная форма такой упаковки — гибкая оболочка, композитный накопитель, кассета, внешний грузовой блок, связанный пакет вещества или иной вариант — должна выбираться уже в конкретном проекте. В настоящей работе важно зафиксировать сам принцип: переносимая масса должна рассматриваться как система “вещество — упаковка — аппарат-носитель”, а не как вещество, помещённое внутрь корпуса аппарата.

Если упаковка создаётся локально, например из полимерных, композитных, волокнистых или иных доступных материалов, она становится частью

производственного цикла, а не грузом, постоянно доставляемым с Земли. Это принципиально для инфраструктурной логики: с Земли доставляется не каждый контейнер вещества, а аппараты и производственные средства, способные многократно создавать, удерживать и перемещать рабочую массу в области формирования структуры.

Этот критерий также показывает, почему нельзя оценивать формирование структуры только по массе подготовленного вещества. Даже если M_{work} достаточно велика, рабочая фракция должна быть включена в транспортно-дозировующий цикл. Если упаковка не удерживает вещество, если аппарат не способен взять внешнюю массу, если значительная часть материала теряется при доставке, если дозирование оказывается нестабильным или если малая доля вещества входит в рабочий профиль, фактическая масса, работающая в структуре, будет существенно меньше подготовленной массы.

Поэтому масса цикла должна оцениваться не как грузоподъёмность аппаратов сама по себе, а как результат всей цепочки: подготовка — упаковка — доставка — высвобождение — рабочее включение.

Тяговая реализуемость рабочего цикла

Восьмым критерием является тяговая реализуемость рабочего цикла. Аппарат-носитель должен не только быть связан с полезной массой, но и иметь возможность вывести её на требуемую орбитальную конфигурацию, выполнить участок высвобождения и вернуться к следующему циклу.

Оптимальным для инфраструктурной схемы является режим, при котором аппарат-носитель использует не только доставленное с Земли топливо или рабочее тело, но и ресурс, получаемый производственно-логистическим узлом. Если каждый рабочий цикл требует доставки топлива с Земли, устойчивость всей системы снижается. Химическое топливо в такой схеме становится нерациональным из-за необходимости постоянной доставки массы, а ядерные или иные высокоэнергетические системы имеют собственные ограничения по мощности, режимам работы, безопасности и управляемости. Поэтому возможность локального получения рабочего тела, воды, топлива или иной расходной массы должна рассматриваться как важное условие долговременной тяговой реализуемости, хотя конкретный тип двигательной установки в настоящей работе не выбирается.

В общем виде условие тяговой реализуемости можно записать как:

$$F_{thrust} \geq F_{required}(M_{payload}, trajectory, T_{cycle})$$

где:

- F_{thrust} (available thrust) — доступная тяга аппарата-носителя;
- $F_{required}$ (required thrust) — требуемая тяга для перемещения полезной массы по заданной траектории за допустимое время цикла;
- $M_{payload}$ (payload mass) — масса вещества вместе со средствами упаковки, удержания и транспортировки;
- $trajectory$ (delivery trajectory) — выбранный участок доставки и высвобождения вещества;
- T_{cycle} (cycle time) — допустимое время полного рабочего цикла.

Здесь запись $F_{thrust} \geq F_{required}(M_{payload}, trajectory, T_{cycle})$ используется как функциональное обозначение и показывает, что требуемая тяга зависит от массы полезной нагрузки, выбранной траектории доставки и допустимого времени выполнения цикла.

Эта запись означает, что аппарат должен обладать достаточной тягой не для абстрактного перемещения груза, а для выполнения полного рабочего цикла в заданных условиях. Величина $F_{required}$ зависит не только от массы полезной нагрузки, но и от орбитальной схемы доставки, времени цикла, необходимости выхода на рабочую траекторию, режима высвобождения вещества и последующего возврата аппарата к зоне загрузки или обслуживания.

Иными словами, тяговая реализуемость определяется связкой: масса полезного груза — траектория — допустимое время цикла — возможность возврата. Если аппарат способен доставить вещество к участку формирования, но не способен вернуться к следующему циклу, он остаётся элементом одноразовой миссии. Если же он способен многократно получать рабочую массу, выходить на требуемую траекторию, выполнять высвобождение, возвращаться, обслуживаться и повторять цикл, он становится элементом производственно-логистической инфраструктуры. Поэтому транспортная часть производственно-логистического узла должна оцениваться одновременно по полезной массе, тяге, времени цикла, ресурсу аппарата, доступности локального рабочего тела и схеме возврата к зоне повторной загрузки. Чем больше доля топлива, рабочего тела и расходных материалов обеспечивается самим узлом, тем меньше зависимость системы от внешних поставок и тем устойчивее становится повторяемая работа аппаратов.

Число рабочих циклов

Девятым критерием является число рабочих циклов, необходимых для формирования структуры. Если известна требуемая рабочая масса участка и масса вещества, фактически входящая в рабочий профиль за один цикл, то минимальное число циклов можно оценить как:

$$N_{cycles} \sim M_{struct} / M_{profile, cycle}$$

где:

- N_{cycles} (number of cycles) — число циклов доставки, высвобождения, измерения и коррекции вещества;
- M_{struct} (structure mass) — масса вещества, необходимая для формирования рабочего профиля рассматриваемого участка структуры;
- $M_{profile, cycle}$ (working-profile mass per cycle) — масса вещества, реально вошедшая в рабочий профиль за один цикл.

Эта запись отличается от простой оценки по массе перевозимого груза. Один аппарат может доставить значительную массу, но если часть вещества потеряна при упаковке, часть — при транспортировке, часть — при высвобождении, а часть — не вошла в рабочий фазовый коридор, фактический вклад цикла будет ниже. Поэтому число циклов зависит не только от грузоподъёмности аппаратов, но и от качества фракционирования, упаковки, доставки, дозирования и рабочего включения вещества.

Интегральные эксплуатационные ограничения

После оценки числа циклов дальнейшие ограничения уже не требуют обязательного введения отдельных формул. Они задают не новые физические параметры, а эксплуатационные пределы, в которых производственно-логистический узел может сохранять инфраструктурный смысл.

Во-первых, формирование структуры должно идти быстрее, чем потеря её рабочего профиля. Это не отдельный физический критерий, а общее требование согласования темпа строительства с темпом деградации. Если первые участки начинают выходить из рабочего диапазона до завершения формирования всего

рабочего профиля, узел фактически не создаёт инфраструктуру, а постоянно компенсирует собственное запаздывание.

Во-вторых, транспортно-дозирующие аппараты должны иметь ресурс, достаточный для многократного повторения полного рабочего цикла. Такой цикл включает не только высвобождение вещества, но и загрузку, выход на рабочую траекторию, доставку, измерение результата, коррекцию, возврат, обслуживание и подготовку к следующему проходу. Если каждый цикл требует нового аппарата, система остаётся серией отдельных миссий, а не локальной инфраструктурой.

В-третьих, обслуживание структуры должно быть достаточно частым и точным, чтобы регулярные потери, фазовый разброс, локальные нарушения концентрации и последствия проходов аппаратов не превращали рабочий профиль в обычное пылевое распределение. При этом обслуживание не сводится к досыпанию массы. Его задача — возвращать структуру в рабочий режим: восстанавливать концентрацию, размерный состав, фазовую и векторную согласованность, а также устранять зоны недонасыщения и перенасыщения.

В-четвёртых, система должна иметь запас устойчивости к редким внешним возмущениям: солнечным вспышкам, корональным выбросам массы, плазменным событиям, потокам микрометеороидов, локальным пылевым возмущениям, ошибкам прохода аппаратов и другим событиям, способным временно нарушить рабочий профиль. Для инфраструктурной системы важно не отсутствие таких воздействий, а возможность обнаружить нарушение, оценить его масштаб и вернуть параметры структуры в допустимый диапазон.

В-пятых, масштаб строительства должен соответствовать реальной или прогнозируемой интенсивности использования. Структура не должна сразу проектироваться как предельно крупный объект, рассчитанный на поток аппаратов, которого ещё нет. Более устойчивой является поэтапная схема: минимальный рабочий участок, проверка режима прохождения, ограниченное обслуживание, рост числа аппаратов, расширение зоны структуры и только затем переход к более крупной конфигурации.

В-шестых, производственно-логистический узел должен постепенно снижать зависимость от Земли. Его инфраструктурный смысл появляется тогда, когда число локальных операций — добычи, переработки, фракционирования, упаковки, доставки, высвобождения, обслуживания и ремонта — начинает существенно превышать число крупных внешних доставок. Чем больше операций выполняется в выбранной орбитальной области, тем сильнее узел отличается от удалённой одноразовой миссии.

Таким образом, после расчёта массы рабочего профиля за цикл ключевое значение имеют не дополнительные частные формулы, а согласование пределов эксплуатации: темпа формирования, скорости деградации, ресурса аппаратов, частоты обслуживания, устойчивости к возмущениям, интенсивности использования и степени автономности локального контура. Эти условия должны учитываться при проектировании сценария, но в настоящей постановочной работе они фиксируются как эксплуатационные ограничения, а не как самостоятельные расчётные критерии.

Сводный набор критериев

Для первого расчётного сценария совокупность требований к производственно-логистическому узлу может быть представлена следующим набором критериев:

$$M_{\text{available}} \geq M_{\text{struct}} + M_{\text{service}} + M_{\text{reserve}}$$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{work}} &\geq Q_{\text{required}} \\
M_{\text{work}} &= \eta_{\text{frac}} * M_{\text{processed}} \\
\eta_{\text{work}} &= M_{\text{profile}} / M_{\text{release}} \\
M_{\text{profile,cycle}} &= N_{\text{carriers}} * m_{\text{payload}} * \eta_{\text{pack}} * \eta_{\text{delivery}} * \eta_{\text{work}} \\
F_{\text{thrust}} &\geq F_{\text{required}} \\
N_{\text{cycles}} &\sim M_{\text{struct}} / M_{\text{profile,cycle}}
\end{aligned}$$

При этом необходимо учитывать, что не все критерии, рассмотренные в настоящей главе, являются независимыми расчётными ограничениями. Часть из них использовалась для последовательного анализа отдельных стадий производственно-логистического цикла: подачи сырья, переработки, получения рабочей фракции, доставки вещества и его включения в рабочий профиль структуры. Такие критерии сохраняют самостоятельное инженерное значение, однако в итоговой постановке оказываются включёнными в более общие показатели.

Поэтому в сводный набор включены только те критерии, которые определяют реализуемость производственно-логистического узла на уровне всей системы и не сводятся к другим ранее введённым параметрам. Иными словами, это не перечень всех рассмотренных критериев, а минимальный набор ключевых условий, от выполнения которых зависит возможность формирования рабочего участка структуры.

Данный набор критериев не является завершённой проектной методикой. Его задача состоит в том, чтобы определить минимальный набор условий, при которых производственно-логистический узел способен не только сформировать орбитально-ориентированную протяжённую дисперсную структуру, но и поддерживать её в рабочем состоянии на протяжении длительного времени.

Экспериментальная проверяемость критериев

Перечисленные критерии должны рассматриваться не только как расчётные параметры будущего производственно-логистического узла, но и как программа экспериментальной проверки. На раннем этапе не обязательно воспроизводить полный астероидный узел. Достаточно последовательно проверять отдельные элементы цепочки: получение рабочей фракции, её упаковку, дозированное высвобождение, измерение фактического распределения, оценку η_{work} , коррекционный проход и повторение цикла.

Поэтому первый экспериментальный этап может использовать заранее подготовленную фракцию и ограниченную выпускную систему. Его задача состоит не в доказательстве зрелой астероидной промышленности, а в проверке того, выполняются ли базовые расчётные критерии в упрощённой системе: сохраняется ли рабочая фракция, контролируется ли высвобождение, измеряется ли профиль, достигается ли приемлемое рабочее включение и может ли повторный проход улучшить распределение.

Такой подход переводит производственно-логистический узел из области единовременного большого проекта в область поэтапной валидации. Полный узел в области малых тел является развитым вариантом системы; ранние эксперименты должны проверять те же критерии в сокращённом масштабе.

Они показывают, что ключевыми являются не только параметры самой среды, но и способность локальной системы получать вещество, подавать его к переработке,

перерабатывать в нужном масштабе, получать рабочую фракцию, удерживать и доставлять массу за цикл, обеспечивать её рабочее включение в профиль структуры, многократно возвращать аппараты к работе, компенсировать потери, восстанавливаться после внешних возмущений и соответствовать реальному темпу эксплуатации.

Таким образом, замедление деградации и компенсация потерь не должны пониматься как устранение всех возмущающих факторов. Радиационное давление, эффект Пойнтинга-Робертсона, гравитационные возмущения, внутренние столкновения, зарядово-плазменные процессы и эксплуатационные изменения не исчезают после формирования структуры. Задача инфраструктурной системы состоит в другом: выбрать область размещения, фракцию, плотность, фазовый режим, коэффициент рабочего включения и схему обслуживания так, чтобы скорость восстановления рабочих параметров была сопоставима со скоростью их потери или превышала её.

Поэтому эксплуатационная долговечность орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры определяется не только естественным временем сохранения частиц, но и способностью производственно-логистического узла поддерживать рабочий профиль. Если структура не обслуживается, её срок ограничивается естественными каналами деградации. Если же система обслуживания способна диагностировать отклонения, компенсировать потери вещества, корректировать распределение, восстанавливать фазовую согласованность и обеспечивать повторное рабочее включение подаваемой массы в профиль структуры, она может рассматриваться как обслуживаемый инфраструктурный объект.

Это переводит вопрос долговечности из пассивной постановки “сколько времени продержится облако” в активную инженерную постановку: какие параметры должны контролироваться, с какой периодичностью их нужно восстанавливать, какая доля подаваемого вещества реально входит в рабочий профиль и какой ресурс производственно-логистического узла необходим для сохранения инфраструктурной функции.

18. Инфраструктурное значение производственно-логистического узла

Производственно-логистический узел имеет значение не только как техническое средство формирования орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры. Его роль шире: он задаёт материальную основу долговременной деятельности в выбранной орбитальной области. Если сама дисперсная структура является искусственной средой движения, то производственно-логистический узел является системой, которая делает возможным её создание, пополнение, обслуживание, коррекцию и расширение.

В этом смысле производственно-логистический узел не должен рассматриваться как вспомогательный аппаратный комплекс. Он является инфраструктурной базой, связывающей местное вещество малых тел, переработку, фракционирование, упаковку, транспортировку, дозированное высвобождение, заправку, ремонт, мониторинг и обслуживание аппаратов. Без такого узла дисперсная структура остаётся физически описанным, но операционно неполным объектом. С ним она становится частью повторяемой производственно-транспортной системы.

Главное инфраструктурное значение узла состоит в переносе основной массы операций из режима внешней доставки в режим локальной работы. В одноразовой схеме каждый новый участок, каждый новый объём вещества, каждый новый запас рабочего тела и каждый ремонтный ресурс должны быть доставлены с Земли или из внутренней части Солнечной системы. В инфраструктурной схеме с Земли доставляется прежде всего высокотехнологическая аппаратная база, а основная масса вещества, часть расходных материалов и потенциально рабочее тело получают локально.

Такой переход меняет смысл затрат. Они не исчезают, но перестают быть полностью привязанными к каждому отдельному запуску вещества. После развёртывания узла главными становятся срок службы оборудования, ресурс аппаратов, способность к ремонту, эффективность переработки, стабильность получения рабочей фракции, доступность локального вещества, коэффициент рабочего включения и число операций, которые узел способен выполнить за время своей работы.

Поэтому производственно-логистический узел создаёт инфраструктурное преимущество только при многократном использовании. Если он выполняет одну операцию и прекращает работу, его значение близко к обычной сложной миссии. Если же он многократно добывает, перерабатывает, фракционирует, упаковывает, транспортирует, высвобождает вещество, измеряет результат, корректирует рабочий профиль, заправляет аппараты, компенсирует потери и обслуживает оборудование, то его капитальная стоимость распределяется между множеством операций.

Именно поэтому в предыдущей главе многократность локальных операций была выделена как одно из эксплуатационных ограничений производственно-логистического узла. Узел становится инфраструктурно оправданным не потому, что его можно доставить и развернуть, а потому, что после развёртывания он выполняет значительно больше локальных операций, чем требует крупных внешних поставок для своего поддержания.

Этот показатель выражает главный инфраструктурный критерий. Узел становится оправданным не потому, что его можно доставить и развернуть, а потому, что после развёртывания он выполняет существенно больше локальных операций, чем требуется крупных внешних доставок для его поддержания. Чем выше это отношение, тем сильнее проявляется инфраструктурный характер системы.

Инфраструктурное значение узла также связано с использованием разных фракций вещества. В обычной логике добычи внимание часто сосредоточено на наиболее ценной фракции: воде, металлах, летучих веществах или дефицитных компонентах. Однако для рассматриваемой постановки важно, что менее ценная или массовая фракция также получает функцию. Она может использоваться для формирования дисперсной структуры, защитной массы, упаковочных элементов, расходных материалов или других технических задач.

За счёт этого производственно-логистический узел снижает зависимость от одной экономической гипотезы. Если проект оправдывается только добычей редкого вещества, его устойчивость зависит от концентрации этого вещества, стоимости доставки, спроса и возможности возврата. Если же узел распределяет материал по нескольким функциональным потокам, полезность извлекаемого вещества возрастает. Вода и летучие вещества могут использоваться как топливо или рабочее тело; металлические и дефицитные компоненты — для накопления,

производства или доставки; массовая фракция — для формирования структуры, защиты, упаковки и обслуживания.

Таким образом, производственно-логистический узел превращает малое тело не просто в источник сырья, а в основу локальной системы обращения с веществом. Это особенно важно для главного пояса астероидов, где значение имеет не один выбранный объект, а возможность работы в области, насыщенной малыми телами и локальными источниками материала. В такой области узел может постепенно расширять свои функции: от первичного получения рабочей фракции до заправки, ремонта, обслуживания аппаратов и формирования новых участков структуры.

Особое значение имеет то, что производственно-логистический узел должен обеспечивать не просто массу вещества, а рабочий профиль структуры. После введения коэффициента рабочего включения становится очевидно, что критична не только масса добытого, переработанного или высвобожденного материала. Критична доля вещества, которая действительно вошла в заданный коридор с допустимой концентрацией, размерным составом, фазовой и векторной согласованностью.

Поэтому инфраструктурное значение узла определяется не валовой добычей и не разовым объёмом выброса вещества. Оно определяется способностью замкнуть цикл: подготовить рабочую фракцию, доставить её к зоне формирования, высвободить в расчётном режиме, измерить результат, оценить рабочее включение, выполнить корректирующий проход и повторить цикл. Только при такой обратной связи производственно-логистический узел превращает дисперсное вещество в инфраструктурную среду, а не в неконтролируемое облако.

Отдельное значение имеет автономность. На начальном этапе производственно-логистический узел может требовать значительного внешнего управления, доставки оборудования, периодических обновлений и контроля с Земли. Однако инфраструктурная логика должна быть направлена на постепенное снижение этой зависимости. Чем больше операций выполняется локально, тем меньше простой при поломках, износе, задержках поставок и необходимости обслуживания.

В этом смысле автономность не является исходным абсолютным условием, но является направлением развития производственно-логистической схемы. Сначала узел может работать как дистанционно управляемый комплекс с высоким уровнем контроля. Затем часть операций может становиться полуавтономной: фракционирование, накопление, упаковка, диагностика, возврат аппаратов, коррекция распределения вещества. На более развитом этапе узел может приблизиться к режиму самоподдержания, при котором значительная часть обслуживания, пополнения, ремонта и создания расходных элементов выполняется на месте.

Такое развитие особенно важно для формирования дисперсной структуры. Первые участки создаются наиболее дорого и сложно: среда ещё не сформирована, параметры движения не проверены, аппараты работают в менее определённом режиме. После появления начального рабочего участка последующие операции могут становиться более повторяемыми. Уже сформированная область может снижать неопределённость проходов, облегчать стабилизацию, повышать предсказуемость дальнейшего расширения структуры и давать возможность точнее оценивать рабочее включение последующих порций вещества.

Поэтому производственно-логистический узел должен рассматриваться как система, способная не только создать первый участок, но и постепенно увеличивать степень собственного участия в расширении структуры. Предельной

инженерной целью является не разовое формирование среды, а рост автономности, автоматизации и способности узла поддерживать новые рабочие циклы с меньшей внешней зависимостью.

Инфраструктурное значение узла проявляется также в его способности связывать разные виды деятельности. Один и тот же комплекс может участвовать в нескольких процессах:

- формировании орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры;
- пополнении и коррекции уже созданных участков;
- получении рабочего тела или топлива;
- накоплении и хранении полезных фракций;
- создании упаковочных и расходных элементов;
- обслуживании транспортных и дозирующих аппаратов;
- ремонте и замене отдельных узлов;
- поддержке аппаратов, не связанных непосредственно с конкретной структурой.

Эта многофункциональность делает производственно-логистический узел более устойчивым. Если часть задач временно не востребована, другие функции могут сохранять ценность узла. Например, даже при низкой интенсивности использования дисперсной структуры узел может выполнять заправочные, сервисные, накопительные или ремонтные операции. И наоборот, если добыча ценных фракций недостаточна для самостоятельного экономического обоснования, массовая фракция может использоваться для формирования структуры и поддержания инфраструктурного режима.

При этом необходимо учитывать ограничение: инфраструктурный узел не должен быть чрезмерно крупным на раннем этапе. Если система сразу проектируется под поток аппаратов, которого ещё нет, поддержание её рабочего состояния может оказаться тяжелее, чем практическая польза. Поэтому развитие узла должно быть поэтапным: минимальная конфигурация, проверка получения фракции, первые циклы доставки и высвобождения, измерение рабочего включения, формирование начального участка, ограниченная эксплуатация, расширение функций, увеличение числа аппаратов и только затем переход к более крупной инфраструктурной системе.

Такой поэтапный подход согласует строительство с эксплуатацией. Производственно-логистический узел должен расти не как изолированный промышленный объект, а как часть развивающейся транспортной и ресурсной среды. Его размер, производительность, число аппаратов, запасы вещества, уровень автономности и частота обслуживания должны соответствовать реальному или прогнозируемому числу операций, которые будут выполняться в выбранной области.

При этом инфраструктурное значение производственно-логистического узла не означает, что его полный развитый вариант должен быть реализован сразу. Расчётные критерии, введённые выше, задают программу поэтапной проверки. На раннем этапе могут проверяться отдельные элементы цикла: подготовка рабочей фракции, упаковка, дозированное высвобождение, измерение распределения, оценка коэффициента рабочего включения и корректирующий проход. Такой эксперимент может выполняться с заранее подготовленной фракцией и

ограниченной выпускной системой, без немедленного развёртывания полной астероидной добычи.

Более развитый производственно-логистический узел в области малых тел является следующим уровнем той же логики. Он требуется не для первого доказательства физического режима, а для масштабирования, обслуживания и расширения структуры в реальной инфраструктурной области. Поэтому путь от настоящей постановки к проектированию должен идти не через одномоментное создание “астероидного завода”, а через последовательную проверку функций, затем их связи, затем повторяемого цикла и только после этого — локальной производственно-логистической системы.

Из этого следует, что производственно-логистический узел имеет двойной статус. С одной стороны, он является обеспечивающей системой для дисперсной структуры. С другой стороны, он сам становится самостоятельным инфраструктурным объектом, поскольку создаёт локальную материальную базу в космическом пространстве. Эта база может обслуживать не только один участок структуры, но и более широкий набор операций: движение аппаратов, заправку, ремонт, накопление ресурсов, создание расходных материалов и поддержку дальних миссий.

Таким образом, производственно-логистический узел завершает связь, необходимую для перехода от физической идеи дисперсной среды к инфраструктурной системе. Первая часть работы задала физический режим структуры и взаимодействие аппарата с направленной дисперсной средой. Вторая часть показывает, за счёт чего такая структура может быть создана материально: через малые тела, локальное вещество, переработку, функциональное разделение фракций, повторяемые рабочие циклы, коэффициент рабочего включения и базовые расчётные критерии узла.

Тем самым вторая часть работы завершает переход от вопроса “может ли такая среда быть физически описана” к вопросу “какая материальная система способна её создавать и поддерживать”. Следующий шаг состоит в применении этой рамки к первому ограниченному расчётному сценарию.

Главный вывод этой части состоит в том, что орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура приобретает инфраструктурный смысл только в связке с системой её формирования. Само по себе распределение частиц ещё не образует долговечную среду движения: оно должно быть создано, измерено, пополнено, скорректировано и связано с аппаратами заданного класса. Поэтому производственно-логистический узел является не внешним дополнением, а материальной основой структуры. Именно эта связка позволяет перейти от общей инженерно-физической постановки к первому ограниченному расчётному сценарию.

Главный вывод этой части состоит в том, что орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура приобретает инфраструктурный смысл только в связке с системой её формирования. Само по себе распределение частиц ещё не образует долговечную среду движения: оно должно быть создано, измерено, пополнено, скорректировано и связано с аппаратами заданного класса. Поэтому производственно-логистический узел является не внешним дополнением, а материальной основой структуры.

Тем самым вторая часть работы показывает, за счёт чего физически описанная дисперсная среда может превратиться в обслуживаемую и расширяемую инфраструктурную систему. Связка производственно-логистического узла и

орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры задаёт минимальную материальную основу, необходимую для перехода от общей инженерно-физической постановки к практической реализации концепции.

Тем самым вторая часть работы завершает переход от вопроса «может ли такая среда быть физически описана» к вопросу «какая материальная система способна её создавать и поддерживать». Следующий шаг состоит в применении этой рамки к первому ограниченному расчётному сценарию.

Часть III. Первый ограниченный расчётный сценарий формирования структуры

Первые две части работы задают общий инженерно-физический и производственно-логистический каркас рассматриваемой концепции. В них определены физический режим дисперсной структуры, условия её взаимодействия с аппаратом, эрозионная цена прохождения, требования к защитной компоновке, деградация, восстановление параметров и роль производственно-логистического узла в подготовке и подаче вещества.

Однако на уровне общей постановки эти элементы ещё не образуют проверяемого сценария. Для этого необходимо перейти к практической части, где структура рассматривается не как абстрактный класс объектов, а как первый ограниченный рабочий участок с заданной областью размещения, рабочей фракцией, геометрией, массой вещества, числом циклов формирования и режимом обслуживания.

Назначение части III состоит в том, чтобы связать ранее введённые параметры в единую расчётную рамку. Здесь проверяется не готовая транспортная сеть и не промышленная система формирования множества участков, а минимальная конфигурация, на которой можно оценить внутреннюю согласованность концепции: достаточно ли вещества, достижима ли требуемая плотность, сколько циклов необходимо для формирования профиля, какая доля высвобожденного вещества входит в рабочую область и при каких условиях участок сохраняет эксплуатационный смысл.

Тем самым часть III переводит работу от общей инженерно-физической постановки к первому расчётно-критериальному сценарию. Она не завершает проектирование структуры, а задаёт уровень, на котором дальнейшие главы могут последовательно рассмотреть выбор области, локальное вещество, доставку с Земли, массу рабочей фракции, геометрию участка, режим формирования, эксплуатационную нагрузку и обслуживание.

19. Переход от общей постановки к первому расчётному сценарию

Первые две части работы формируют общий инженерно-физический и производственно-логистический каркас рассматриваемой концепции. На этом уровне определены физический режим орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры, условия взаимодействия среды с аппаратом, требования к защитной компоновке, механизмы формирования и обслуживания структуры, а также роль производственно-логистического узла в подготовке, подаче и поддержании рабочего профиля вещества.

Проведённый анализ показывает, что на современном уровне развития технологий в рассматриваемой постановке не выявлено принципиальных физических или инженерных препятствий, исключающих возможность формирования и эксплуатации подобных структур. Это не означает доказанной практической эффективности или завершённости проектных решений, однако позволяет перейти от рассмотрения принципиальной реализуемости концепции к анализу сценариев её практического применения.

Поэтому практическая часть настоящей работы начинается не с полной транспортной сети и не с отдельных лабораторных экспериментов, а с первого ограниченного рабочего сценария, в котором основные элементы концепции впервые рассматриваются как единая операционно-инженерная система.

Задача такого сценария состоит в том, чтобы определить, каким образом ранее сформулированные положения могут быть объединены в работоспособную конфигурацию, какие параметры должны быть заданы для её функционирования и какие вопросы требуют дальнейшей экспериментальной проверки.

Переход к первому ограниченному рабочему сценарию

Проведённая в первых двух частях работа позволяет рассматривать орбитально-ориентированную протяжённую дисперсную структуру не только как физически допустимый класс объектов, но и как систему, для которой могут быть заданы исходные инженерные параметры. Поэтому дальнейший шаг состоит в переходе от общей реализуемости к первому ограниченному рабочему сценарию, где структура рассматривается уже не как абстрактная возможность, а как конкретный обслуживаемый участок с заданной функцией, средой взаимодействия, аппаратом и производственно-логистическим циклом.

На этом уровне практическая часть должна показать, каким образом ранее введённые элементы могут быть объединены в единую расчётную конфигурацию. Для этого требуется определить не максимальный масштаб будущей инфраструктуры, а минимальный участок, на котором проявляются основные свойства структуры: направленная дисперсная среда, рабочая фракция, взаимодействие с аппаратом или проходным модулем, коэффициент рабочего включения, допустимая эрозионная цена, формирование профиля, измерение результата и последующее обслуживание.

Такой переход важен потому, что принципиальная реализуемость ещё не равна эксплуатационной пригодности. Даже если отдельные элементы не требуют новой физики и имеют инженерные аналоги, их совместная работа должна быть проверена в рамках единой конфигурации. Первый рабочий сценарий задаёт именно такую конфигурацию: достаточно ограниченную для расчётной оценки и достаточно полную, чтобы оценивать не отдельный эффект, а связку «среда — аппарат — производственно-логистический цикл».

Поэтому дальнейшее рассмотрение должно ответить на практический вопрос: какой минимальный участок необходимо сформировать, чтобы структура начала проявлять себя как обслуживаемая инфраструктурная среда, а не как разовый эксперимент или абстрактное распределение вещества. Ответ на этот вопрос определяет состав последующих расчётных глав.

Три уровня проверки

В настоящей работе необходимо различать три уровня проверки.

Первый уровень — предварительный экспериментальный сценарий. Его задача состоит в проверке отдельных физических и инженерных эффектов: подготовки рабочей фракции, дозированного высвобождения вещества, диагностики распределения частиц, оценки коэффициента рабочего включения и взаимодействия аппарата с направленной разреженной дисперсной средой.

Второй уровень — первый рабочий сценарий. На этом уровне структура рассматривается уже не как отдельный эксперимент, а как ограниченный инфраструктурный объект, обладающий локальным веществом, повторяемыми

циклами формирования и обслуживания, а также определённым эксплуатационным назначением.

Третий уровень — развитая инфраструктурная система. Он предполагает существование сети участков, устойчивого производственно-логистического комплекса, регулярной эксплуатации и масштабирования инфраструктуры.

Практическая часть настоящей работы относится именно ко второму уровню. Выбор такого уровня связан с тем, что первый уровень ещё не позволяет оценивать инфраструктурную полезность структуры как системы, а третий уровень уже требует решения большого числа задач, выходящих за пределы первоначальной проверки концепции.

Лабораторные и околосемные эксперименты способны подтвердить отдельные физические эффекты: подготовку рабочей фракции, дозированное высвобождение вещества, диагностику распределения, взаимодействие аппарата со средой и определение коэффициента рабочего включения. Однако сами по себе такие эксперименты ещё не показывают, может ли структура существовать как обслуживаемый объект с повторяемыми циклами эксплуатации.

С другой стороны, рассмотрение полноценной инфраструктурной сети потребовало бы одновременно решать вопросы масштабирования, многократного расширения, распределённого обслуживания, взаимодействия различных участков и долгосрочной экономики системы. Для первой расчётной проверки такой уровень преждевременен.

Поэтому в настоящей работе выбирается промежуточный уровень: минимальный рабочий инфраструктурный участок, достаточно простой для расчётной оценки и одновременно достаточно полный для проверки основных положений концепции.

Определение первого рабочего сценария

В качестве первого рабочего сценария рассматривается ограниченный инфраструктурный участок орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры, предназначенный для повторяемого использования аппаратами сходного класса.

Такой участок должен обладать несколькими признаками.

Во-первых, он должен использовать локальное вещество или предусматривать возможность перехода к его использованию.

Во-вторых, он должен допускать диагностику, обслуживание и коррекцию параметров.

В-третьих, он должен обеспечивать повторяемость прохождения аппаратов без необходимости полного восстановления после каждого использования.

В-четвёртых, он должен рассматриваться как элемент потенциально расширяемой инфраструктуры, а не как одноразовая операция.

Перечисленные признаки задают не требования к некоторой абстрактной будущей системе, а параметры, которые должны быть рассмотрены в рамках настоящей работы. Именно поэтому первый рабочий сценарий формируется как ограниченный инфраструктурный участок, для которого могут быть последовательно определены источник вещества, производственно-логистический цикл, рабочая фракция, геометрия среды, режим формирования, условия обслуживания и характер взаимодействия с аппаратом.

На данном этапе не предполагается, что все вопросы уже имеют окончательное инженерное решение. Однако проведённый ранее анализ показывает, что для каждого из перечисленных элементов существуют известные физические механизмы, инженерные аналоги или технологические решения различного уровня готовности. Поэтому дальнейшая задача состоит не в доказательстве принципиальной возможности такого участка, а в проверке того, может ли совокупность этих элементов быть объединена в согласованную рабочую конфигурацию.

Выбор основной функции первого участка

Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура потенциально способна выполнять множество различных функций. Однако для первого расчётного сценария необходимо выбрать одну функцию, которая наиболее наглядно демонстрирует инфраструктурный смысл рассматриваемой концепции.

В настоящей работе такой функцией принимается использование структуры как направляющей и стабилизирующей среды для выхода аппарата, разгонно-направляющего блока или специализированного кинетико-аэродинамического модуля при переходе на высокоэнергетическую орбиту с меньшими требованиями к коррекции, стабилизации и запасу рабочего тела.

Именно эта функция выбрана как наиболее наглядная для проверки, поскольку позволяет одновременно оценивать взаимодействие аппарата со средой, требования к геометрии участка, рабочей фракции и коэффициенту рабочего включения, допустимую эрозионную цену, устойчивость профиля структуры, условия обслуживания и эксплуатационную полезность её существования.

Кроме того, такой выбор позволяет отличить рассматриваемый подход от чисто баллистической схемы движения. В данном случае аппарат проходит через заранее подготовленную и поддерживаемую среду, параметры которой становятся частью общего траекторного решения. Тем самым часть требований к точности прохождения, коррекции и стабилизации переносится с аппарата на сформированный инфраструктурный участок.

При этом первый участок не рассматривается как самостоятельная двигательная система и не предназначен для создания основного межпланетного Δv . Его задача состоит в изменении условий прохождения выбранного участка траектории и формировании измеримого инфраструктурного эффекта.

Для первого рабочего сценария важно и то, что результат такого прохождения может быть непосредственно измерен. Изменение параметров орбиты после выхода из структуры позволяет оценивать не только локальный эффект взаимодействия со средой, но и его дальнейшее развитие на последующих участках траектории. Благодаря этому структура рассматривается не как область разового воздействия, а как элемент, способный создавать долговременный траекторный результат.

Именно возможность наблюдать, измерять и накапливать такой результат делает направляюще-стабилизирующую функцию наиболее удобной для первого расчётного сценария и позволяет оценивать структуру не только как физический объект, но и как потенциальный элемент будущей транспортной инфраструктуры.

Границы сценария

Первый рабочий сценарий не рассматривается как полная межпланетная транспортная система, сеть протяжённых участков между планетами или завершённая промышленная инфраструктура. Такое ограничение связано не с

произвольным сужением области рассмотрения, а с необходимостью выделить круг вопросов, без решения которых дальнейшее масштабирование системы не имеет практического смысла.

На данном этапе наибольшую неопределённость представляют не отдельные технические решения сами по себе, а их совместная работа в рамках единой структуры. Необходимо определить, может ли быть сформирован устойчивый рабочий профиль, какая доля вещества действительно участвует в формировании полезной среды, насколько долго сохраняются параметры структуры, каким образом осуществляется её обслуживание и способен ли участок создавать измеримый эксплуатационный результат.

Именно поэтому выбирается тот уровень сценария, который позволяет проверить элементы с наименьшей технологической определённой, не требуя одновременно разворачивания всей инфраструктуры. До тех пор пока не получены ответы на эти вопросы, обсуждение распределённой сети участков, зрелой астероидной промышленности или регулярной транспортной эксплуатации неизбежно будет опираться на предположения с высокой степенью неопределённости.

В результате границы сценария задаются не сверху, а определяются самими задачами проверки. Они приводят к необходимости выбрать конкретную расчётную область, рабочую фракцию, геометрию участка, режим формирования, способ обслуживания и критерии полезного действия. Именно к этим параметрам последовательно переходит дальнейшее рассмотрение.

Таким образом, задача первого сценария состоит не в демонстрации максимально возможного масштаба будущей системы, а в получении первого согласованного решения для тех элементов, которые в наибольшей степени определяют реализуемость всей концепции. Каким образом решаются эти вопросы и к каким параметрам это приводит, рассматривается в последующих главах части III.

Какие параметры должны быть определены далее

После выбора первого рабочего сценария необходимо определить параметры, без которых невозможно перейти к количественной оценке структуры.

К ним относятся:

- расчётная область размещения;
- рабочая фракция вещества;
- источник вещества;
- масса рабочего профиля;
- геометрия участка;
- способ формирования структуры;
- циклы подачи и обслуживания;
- эксплуатационная нагрузка;
- критерии расширения и дальнейшего масштабирования.

Именно этим вопросам посвящены последующие главы части III.

20. Расчётная область, исходная конфигурация и допущения первого сценария

После определения первого рабочего сценария необходимо задать исходную конфигурацию, в рамках которой он будет рассматриваться далее. На этом этапе речь идёт не о точном проекте будущего участка, а о выборе области размещения, рабочего диапазона частиц, источника вещества и исходных ограничений, позволяющих перейти к количественным оценкам.

Практическая часть должна использовать достаточно конкретную конфигурацию, чтобы избежать произвольности расчётов. Одновременно эта конфигурация не должна пониматься как окончательный проект: конкретная область, рабочая фракция, базовое тело, сырьевые тела и режим обслуживания должны уточняться в последующих расчётах и экспериментальных проверках.

Разделение уровней размерного диапазона частиц

Перед выбором области и параметров первого участка необходимо разделить три уровня размерного диапазона частиц.

Первый уровень — широкий естественный и наблюдательный ориентир:

$d_p \sim 1\text{--}100 \text{ мкм}$

Этот диапазон используется в теоретической части как исходная область сопоставления с реальными дисперсными средами Солнечной системы. Он показывает, что частицы микронного и десяткамикронного порядка не являются произвольной фантастической величиной: такие частицы встречаются в данных о межпланетной пыли и могут рассматриваться как физически реалистичный класс вещества для дальнейшей инженерной постановки.

Однако этот широкий диапазон не означает, что вся фракция 1–100 мкм должна использоваться как рабочая основа первого участка. Особенно важно не смешивать наблюдательный диапазон с рабочим инженерным диапазоном. Частицы порядка 1 мкм и меньше сильнее подвержены радиационному давлению, эффекту Пойнтинга — Робертсона, зарядовым и плазменным процессам, а также быстрее теряют фазовую и орбитальную согласованность. Поэтому мелкая фракция может учитываться как ограничение, побочный продукт или объект отбраковки, но не должна определять базовый рабочий режим первого участка.

Второй уровень — рабочий инженерный диапазон:

$d_p \sim 10\text{--}100 \text{ мкм}$

Этот диапазон уже ближе к практическому сценарию. Он исключает наиболее проблемную мелкую фракцию и лучше соответствует задаче долговечности, фракционного контроля, предсказуемости взаимодействия с аппаратом и ограничения эрозионной неопределённости. Именно область 10–100 мкм следует рассматривать как основной рабочий диапазон для последующих инженерных уточнений.

Третий уровень — узкий расчётный диапазон первого сценария:

$d_p \sim 50\text{--}70 \text{ мкм}$

В настоящей практической части этот диапазон принимается как базовая фракция первого рабочего участка. Такой выбор не утверждает, что именно частицы 50–70 мкм являются единственно возможными или оптимальными для всех будущих

структур. Он используется как расчётное упрощение, позволяющее избежать чрезмерной неопределённости, связанной с широким распределением размеров, и проверить расчётную постановку на более управляемом классе частиц.

При этом узкий диапазон 50–70 мкм следует понимать не как окончательную цель, а как промежуточное расчётное приближение. Он используется как инструмент ограничения числа переменных на первом этапе анализа. В предельном инженерном варианте предпочтительной является не просто размерная фракция, а конкретная целевая рабочая фракция с высокой морфологической однородностью. Такая фракция должна быть близка не только по размеру частиц, но и по форме, плотности, механическим свойствам и характеру взаимодействия с поверхностью аппарата.

Например, в качестве одного из лабораторно проверяемых вариантов могут рассматриваться алюминиевые микросферы порядка 50 мкм, если они обеспечивают приемлемую связку между импульсным воздействием, допустимой эрозионной ценой, технологичностью получения и предсказуемостью контакта. Однако выбор такой фракции не может быть задан только теоретически. Он должен определяться на первом лабораторном этапе через сравнение разных материалов, форм частиц, распределений размеров и режимов удара.

Поэтому стратегическая цель состоит не в использовании произвольного диапазона частиц, а в переходе от широкого наблюдательного диапазона к инженерному диапазону, затем к узкой расчётной области и далее к экспериментально подтверждённой целевой рабочей фракции. Диапазон 50–70 мкм в настоящей работе используется как расчётная рамка, тогда как окончательная фракция должна быть уточнена экспериментально.

Околоземный эксперимент и первый рабочий сценарий структуры

При выборе области для первого практического сценария необходимо различать несколько уровней проверки:

- предварительный околоземный экспериментальный сценарий;
- возможный промежуточный этап у внутренней границы главного пояса;
- первый рабочий инфраструктурный сценарий во внутренней части главного пояса астероидов.

Предварительный экспериментальный сценарий в реальности может быть размещён ближе к Земле. Околоземное пространство имеет очевидные преимущества: меньшая дальность доставки, более простая связь, быстрее возвращаемая телеметрия, более короткий цикл экспериментов, возможность оперативной коррекции и меньшая стоимость отдельных проверок.

Поэтому для проверки отдельных физических и инженерных эффектов околоземный экспериментальный участок может быть более удобным. На таком этапе могут проверяться взаимодействие аппарата с направленным потоком частиц, устойчивость фазового разброса, работа датчиков, эрозионные нагрузки, поведение защитно-стабилизирующего модуля, дозированное высвобождение вещества, измерение фактического распределения и оценка коэффициента рабочего включения.

Для такого предварительного эксперимента допустимо использовать заранее подготовленную рабочую фракцию. Это не подменяет задачу локальной астероидной переработки, а отделяет одну проверку от другой. Сначала может проверяться физический режим дисперсной среды и управляемость

высвобождения, затем — возможность локального получения, фракционирования и подачи вещества в области малых тел.

Однако околоземная область хуже подходит для первого рабочего инфраструктурного сценария. Здесь выше плотность действующей космической инфраструктуры, больше ограничений безопасности, сильнее правовые и регуляторные риски, выше значимость космического мусора, а любые операции с дисперсным веществом требуют особенно жёсткого контроля. Даже если отдельный околоземный эксперимент возможен, масштабирование такой среды вблизи Земли будет ограничено требованиями безопасности, возможными рисками для действующих аппаратов и недопустимостью неконтролируемого распространения частиц.

Поэтому в настоящей работе различаются два основных типа сценариев:

— околоземный экспериментальный сценарий — для ограниченной проверки отдельных физических и инженерных эффектов при минимальной дальности доставки и высокой доступности наблюдения;

— первый рабочий инфраструктурный сценарий во внутренней части главного пояса астероидов — для анализа долговременного формирования, обслуживания и эксплуатации орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры в более устойчивой, безопасной и ресурсно обеспеченной области.

Дальнейшее рассмотрение в настоящей части относится именно ко второму сценарию: первому рабочему инфраструктурному сценарию во внутренней части главного пояса астероидов. Это не исключает более ранних околоземных экспериментов, но позволяет рассматривать первый полноценный инфраструктурный объект в условиях, где долговечность, доступность вещества, безопасность для Земли, повторяемые рабочие циклы и снижение внешних рисков имеют большее значение, чем минимальная дальность от Земли.

Выбор внутренней части главного пояса астероидов

В качестве расчётной области для первого рабочего сценария выбирается внутренняя часть главного пояса астероидов. Такой выбор обусловлен не тем, что эта область проще для первичного эксперимента, а тем, что она лучше подходит для демонстрации долговременной инфраструктурной логики.

Главный пояс астероидов сочетает несколько важных преимуществ. Во-первых, там присутствует большое количество локального вещества, которое потенциально может быть использовано как сырьё для формирования дисперсной структуры. Во-вторых, эта область позволяет выбирать относительно спокойные орбитальные зоны, где параметры структуры могут сохраняться дольше, чем в сильно возмущённых областях около крупных тел. В-третьих, удалённость от Земли снижает риски для действующей околоземной инфраструктуры. В-четвёртых, главный пояс позволяет рассматривать не одиночную экспедицию к одному ценному астероиду, а инфраструктурную зону, где рядом могут существовать базовое тело, сырьевые тела, производственно-логистический узел и рабочий участок дисперсной структуры.

В качестве расчётной области принимается не весь главный пояс астероидов, а его внутренняя часть. Главный пояс в целом расположен между орбитами Марса и Юпитера; в справочных описаниях основная концентрация астероидов указывается в диапазоне порядка 2,12–3,3 а.е. от Солнца. Для настоящей постановки выбирается условная зона порядка:

2,3–2,5 а.е.

Эта зона рассматривается как более близкая к Земле часть главного пояса, сохраняющая при этом преимущества удалённой, менее загруженной и ресурсно обеспеченной орбитальной области.

Выбор зоны 2,3–2,5 а.е. не означает указание точного места размещения структуры. Это предварительная расчётная область поиска. Конкретный участок должен выбираться с учётом динамической устойчивости, доступности локального вещества, отсутствия близости к крупным телам, удобства размещения производственно-логистического узла и допустимой скорости деградации параметров дисперсной структуры.

Принципиально важно избегать выраженных резонансных зон. Распределение астероидов в главном поясе содержит щели Кирквуда, связанные со средними резонансами с Юпитером; JPL указывает основные резонансные провалы 3:1, 5:2, 7:3 и 2:1¹⁴. Поэтому зона 2,3–2,5 а.е. рассматривается не как готовый адрес, а как область, внутри которой конкретный участок должен выбираться вне выраженных резонансных областей, вдали от крупных возмущающих тел и с учётом возможности длительного обслуживания структуры.

Выбранная область размещения должна дополнительно проверяться по времени орбитального рассогласования, скорости роста фазового разброса и сроку сохранения рабочего профиля между циклами диагностики, коррекции и пополнения. Если параметры среды уходят из допустимого режима быстрее, чем производственно-логистический узел способен их восстановить, такой участок не может считаться пригодным для долговременного рабочего сценария.

Такой выбор области решает несколько задач одновременно. Во-первых, он обеспечивает относительную близость к Земле по сравнению с внешними областями Солнечной системы. Во-вторых, он позволяет использовать локальное вещество малых тел, не поднимая основную массу материала из глубокой гравитационной ямы. В-третьих, он снижает риски для Земли и действующей околоземной инфраструктуры. В-четвёртых, он позволяет рассматривать производственно-логистический узел не как аппарат, полностью зависящий от доставки вещества с Земли, а как систему, постепенно вовлекающую локальное сырьё в цикл формирования структуры.

Возможный промежуточный этап у внутренней границы пояса

Следует различать первый рабочий расчётный участок и возможную первичную миссию снижения риска. Первый рабочий участок в настоящей работе рассчитывается для более устойчивой и ресурсно оправданной области внутренней части главного пояса, порядка 2,3–2,5 а.е. Однако до развёртывания такого участка может быть целесообразен промежуточный демонстрационно-инфраструктурный этап ближе к внутренней границе главного пояса, например в области порядка 2,0 а.е.

¹⁴ Murray C.D., Dermott S.F. Solar System Dynamics. Cambridge University Press, 1999. Используется как источник по динамической структуре Главного пояса астероидов и связанным с орбитальными резонансами областям повышенной неустойчивости, включая щели Кирквуда, которые рассматриваются в настоящей работе как нежелательные зоны размещения дисперсной структуры.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781139174817>

при условии выбора участка вне выраженных резонансных зон. Возможный более близкий этап порядка 2,0 а.е. может рассматриваться как промежуточная миссия снижения риска, но не заменяет основной расчёт первого полноценного участка.

Смысл такого промежуточного этапа состоит в снижении риска первой миссии, связанного с неполной наблюдательной картиной малых тел. По мере входа в главный пояс растёт значение объектов, которые труднее заранее учесть: астероидов десятков метров, метровых и субметровых фрагментов, локальных скоплений обломков и пылевой компоненты. Такие объекты не обязательно создают высокую вероятность столкновения, но они повышают требования к диагностике коридора, локальному картированию и автономному уклонению.

Чем глубже выполняется первое развёртывание, тем больше область, которую необходимо обследовать и сопровождать разведывательными средствами до начала основной работы производственно-логистического узла. Поэтому более близкий этап у внутренней границы главного пояса может уменьшить не столько энергетическую, сколько диагностическую и навигационную неопределённость первой миссии. Он позволяет проверить добычу, переработку, фракционирование, упаковку, подачу и дозированное высвобождение вещества на ограниченной конфигурации, прежде чем переносить подтверждённую технологию в более глубокую и устойчивую область 2,3–2,5 а.е.

При этом более близкий вариант требует собственной проверки. Область у внутренней границы главного пояса не должна выбираться механически только из-за меньшей дальности. Необходимо учитывать резонансные зоны, безопасные коридоры доставки и возврата, локальную плотность малых тел, возможность диагностики, а также наличие аппаратов, способных уточнять локальную обстановку. Поэтому в настоящей работе такой этап рассматривается как возможная ступень снижения риска, тогда как основной расчёт первого полноценного участка выполняется для зоны 2,3–2,5 а.е.

Расчётная область структуры в таком случае задаётся как внутренняя часть пояса, условно порядка 2,3–2,5 а.е., с последующим уточнением конкретного участка по динамической устойчивости, удалённости от выраженных резонансных областей, доступности локального вещества, времени орбитального рассогласования и возможности обслуживания.

Базовое и сырьевое тело

В выбранном сценарии необходимо различать как минимум два функциональных типа малых тел.

Первое — базовое или опорное тело, рядом с которым размещается часть производственно-логистического узла: энергетические, перерабатывающие, накопительные, упаковочные, дозирующие и обслуживающие системы. Такое тело важно не только как источник вещества, но и как удобная область для размещения оборудования, стабилизации операций, повторяемости рабочих циклов и обслуживания аппаратов.

Второе — сырьевое тело или сырьевой участок, вещество которого используется как расходный материал для дисперсной структуры, топлива, рабочего тела, упаковки, защитной массы или иных функциональных потоков. Для сырьевого тела важны доступность вещества, состав, механическая структура, возможность дробления, фракционирования и переработки без чрезмерных энергетических затрат.

Базовое и сырьевое тело могут совпадать, но для первого рабочего сценария полезно различать их функции. Базовое тело должно обеспечивать устойчивость размещения оборудования и повторяемость рабочих циклов. Сырьевое тело должно обеспечивать доступное вещество, пригодное для переработки, фракционирования и распределения по функциональным потокам.

Конкретные астероиды в настоящей версии не выбираются. Такой выбор потребовал бы отдельного анализа орбит, состава, механической прочности, рисков фрагментации, энергетики доставки, устойчивости операций, безопасности, доступности локального вещества и скорости орбитального рассогласования. Поэтому настоящая глава задаёт не список объектов, а критерии, по которым будущий расчётный сценарий должен выбирать конкретную область и конкретные тела.

Исходные допущения первого сценария

В качестве исходных допущений принимаются следующие положения.

— Структура формируется во внутренней части главного пояса астероидов, в условной орбитальной зоне порядка 2,3–2,5 а.е. от Солнца.

— Конкретный участок выбирается вне выраженных резонансных областей, включая зоны, связанные со щелями Кирквуда, и вдали от крупных тел, чтобы снизить скорость деградации параметров.

— Выбранная область должна в дальнейшем проверяться по времени орбитального рассогласования, фазовому разбросу и условию $T_{orb_disp} \geq T_{service}$.

— Возможный предварительный околоземный эксперимент рассматривается как этап проверки физических и инженерных эффектов, но не как основной рабочий инфраструктурный сценарий.

— Возможный промежуточный этап ближе к внутренней границе пояса, порядка 2,0 а.е., рассматривается как миссия снижения риска, но не как основной расчётный сценарий первого полноценного участка.

— Вещество для формирования структуры в рабочем инфраструктурном сценарии должно по возможности использоваться локально, из доступного материала малых тел, а не доставляться крупными объёмами с Земли.

— Для предварительного экспериментального этапа допустимо использование заранее подготовленной рабочей фракции, поскольку такой этап проверяет физический режим среды, дозированное высвобождение и измерение рабочего включения, а не полную локальную астероидную переработку.

— С Земли в базовом рабочем сценарии доставляются прежде всего высокотехнологические аппараты, производственные узлы, системы переработки, дозирования, мониторинга и управления.

— Формирование структуры предполагает не единичный выброс вещества, а серию рабочих циклов долговечных аппаратов, способных многократно выполнять операции доставки, распределения, мониторинга и коррекции параметров среды.

— Должен учитываться коэффициент рабочего включения вещества: важна не только масса высвобождения, но и доля вещества, реально вошедшая в рабочий профиль структуры.

— Первый участок не должен сразу рассчитываться на массовый поток аппаратов; его масштаб должен соответствовать начальной эксплуатационной нагрузке, с возможностью последующего расширения.

— Эксплуатационная ценность структуры определяется не разовым созданием пылевого распределения, а способностью сохранять или восстанавливать рабочие параметры на протяжении заданного срока.

— Экономическая и инфраструктурная целесообразность первого участка возникает не только из факта его создания, а из повторяемого использования, обслуживания, снижения требований к отдельным манёврам и включения участка в работу производственно-логистического узла.

Эти допущения позволяют избежать двух крайностей. С одной стороны, работа не сводится к абстрактному утверждению, что дисперсная структура может быть создана в произвольной области космоса. С другой стороны, она не претендует на окончательный промышленный проект с точным расчётом всех масс, сроков, стоимости, способов добычи и переработки вещества. Цель практической части состоит в другом: показать, какие элементы должны быть включены в первый операционно-инженерный сценарий и какие параметры необходимо оценивать для перехода от концепции к расчётной проверке.

Сформулированные выше допущения задают не проверочную матрицу, а исходную рамку первого сценария. На этом этапе важно определить, где размещается расчётный участок, какой диапазон вещества принимается в качестве исходного, какие предварительные этапы допускаются и какие ограничения должны учитываться до перехода к оценке массы, геометрии, циклов формирования и обслуживания.

Итог главы

Основной вывод настоящей главы состоит в том, что первый рабочий сценарий должен рассматриваться не в произвольной области пространства и не для произвольного вещества, а в рамках конкретной исходной конфигурации. В качестве расчётной области принимается внутренняя часть главного пояса астероидов порядка 2,3–2,5 а.е., а в качестве базовой рабочей фракции — узкий расчётный диапазон порядка 50–70 мкм с последующим переходом к экспериментально подтверждённой морфологически однородной фракции.

При этом необходимо различать предварительный околоземный эксперимент, возможный промежуточный этап снижения риска и первый полноценный инфраструктурный сценарий. Околоземный эксперимент может использоваться для проверки отдельных физических и инженерных эффектов, но не подменяет первый рабочий участок. Промежуточный этап у внутренней границы главного пояса может снизить диагностическую и навигационную неопределённость, но основной расчёт первого полноценного участка в настоящей работе выполняется для зоны 2,3–2,5 а.е.

Тем самым настоящая глава задаёт исходную конфигурацию для последующих расчётных глав: область размещения, предварительный диапазон рабочей фракции, различие между экспериментальным и рабочим сценарием, а также базовые ограничения для выбора локального вещества, формирования, обслуживания и последующего расширения.

21. Локальное накопление, упаковка и подача дисперсного вещества

После выбора первого расчётного сценария необходимо определить, каким образом вещество для орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной

структуры должно вовлекаться в рабочий цикл. В предыдущей главе было принято, что первый полноценный участок рассматривается во внутренней части главного пояса астероидов, в условной области порядка 2,3–2,5 а.е., а его рабочая фракция в первом приближении задаётся диапазоном 50–70 мкм. Теперь необходимо перейти от выбора области и функции участка к вопросу о веществе: откуда оно берётся, как накапливается, как подготавливается к подаче и почему его нельзя просто доставлять крупными объёмами с Земли.

В рамках рассматриваемой постановки крупные объёмы дисперсного вещества не должны каждый раз доставляться с Земли. Базовая логика инфраструктурного подхода предполагает, что вещество, средства его временного хранения, упаковки, накопления и подачи по возможности создаются или разворачиваются в области работ. С Земли в такой схеме доставляются прежде всего высокотехнологические аппараты и узлы: машины добычи, переработки, сортировки, упаковки, транспортировки, дозирования и контроля вещества, тогда как основная масса рабочего материала вовлекается в цикл формирования структуры локально.

Естественные источники вещества также представляют интерес для настоящей работы. Кометы после прохождения активной области фактически создают протяжённые дисперсные следы, состоящие из частиц, движущихся по орбитам, близким к орбите родительского тела. В этом смысле комета может рассматриваться как естественный аналог операции распыления вещества. Однако такие следы формируются естественным образом и не обеспечивают управляемого размерного состава, контролируемой плотности, фазовой согласованности и обслуживания структуры. Поэтому они представляют интерес прежде всего как физический прецедент существования протяжённых дисперсных образований, а не как готовый инфраструктурный механизм.

Такой подход соответствует общей логике использования местных ресурсов в космосе: чем больше масса создаваемой инфраструктуры, тем менее рационально доставлять весь расходный материал с Земли. NASA рассматривает использование местных ресурсов как направление, связанное с получением материалов, топлива и иных ресурсов из доступной внеземной среды, а не только с доставкой готовых запасов с Земли ¹⁵. В настоящей работе эта логика применяется не к строительству базы или производству топлива как таковому, а к формированию расходной дисперсной среды, необходимой для первого участка структуры.

При этом важно не завышать технологическую готовность рассматриваемой схемы. Производственно-логистический узел в настоящей работе не описывается как уже существующая промышленная система, способная немедленно добывать, перерабатывать и подавать вещество в главном поясе астероидов. Он задаётся как необходимый класс инфраструктурных средств, без которого концепция дисперсной структуры не может перейти от физической постановки к практической проверке. Поэтому данная глава не утверждает готовность “астероидной фабрики”,

¹⁵ NASA — In-Situ Resource Utilization (ISRU). Используется как источник по общей логике вовлечения местных ресурсов и снижения объёма грузов, доставляемых с Земли, при развитии космической инфраструктуры
<https://www.nasa.gov/mission/in-situ-resource-utilization-isru/>

а формулирует минимальную операционную цепочку, которую такая система должна будет обеспечить.

Локальное вовлечение вещества не должно пониматься как обязательное условие самой первой демонстрационной миссии. На раннем этапе возможен вариант, при котором рабочая фракция полностью или частично доставляется с Земли, а производственно-логистический узел либо отсутствует, либо представлен минимальным набором функций: хранением, дозированием, выпуском, диагностикой и оценкой рабочего включения. Такой сценарий не является полноценной инфраструктурной моделью, но он может быть оправдан как промежуточная проверка физического режима среды, дозированного высвобождения и поведения дисперсного профиля до развёртывания локального сырьевого цикла.

Этап I. Получение локального вещества

Выбор внутренней части главного пояса астероидов связан не только с орбитальными условиями, но и с возможностью вовлечения локального вещества. Если рабочее вещество доставляется с Земли, то даже ограниченный участок дисперсной структуры быстро превращается в задачу массовой транспортировки расходного материала. Это противоречит инфраструктурной логике предлагаемого подхода: структура должна постепенно становиться местной обслуживаемой системой, а не повторяющейся серией доставок пыли с Земли.

Локальное вещество в настоящей работе понимается широко. Это может быть материал малых тел, поверхностный реголит, обломочный материал, рыхлая фракция, продукт механического дробления, побочные фракции переработки или материал, специально подготовленный производственно-логистическим узлом. Конкретный состав вещества в настоящей версии не выбирается, поскольку это потребовало бы отдельного анализа конкретного астероида, его минералогии, механической структуры, прочности, пористости, тепловых свойств и динамики работ.

Для настоящей версии важно другое: рабочая фракция дисперсной структуры должна быть получаемая из локального вещества в принципе. NASA OSIRIS-REx фактически подтвердил возможность получения и возвращения образца вещества с поверхности астероида Bennu, включая пыль и каменный материал, что показывает реальность малых тел как источников твёрдого вещества для анализа и технологической постановки¹⁶. Однако это не следует понимать как прямое доказательство готовности промышленной добычи. Возврат образца и создание длительно работающего производственно-логистического узла — разные уровни задачи.

Поэтому в настоящей работе локальное вещество рассматривается не как готовый ресурс, автоматически пригодный для подачи в структуру, а как исходное сырьё. Оно должно пройти несколько стадий: извлечение, предварительную подготовку, дробление или измельчение, фракционирование, морфологическую

¹⁶ OSIRIS-REx Mission to Asteroid Bennu. National Aeronautics and Space Administration (NASA) (**Миссия OSIRIS-REx к астероиду Bennu**). Используется как подтверждение практической возможности исследования астероида, получения образца вещества с его поверхности и последующей доставки этого образца на Землю. В рамках миссии была продемонстрирована реальность малых тел как источников твёрдого вещества для анализа и технологической отработки, однако источник не рассматривается как подтверждение готовности промышленной добычи астероидного вещества.

<https://science.nasa.gov/mission/osiris-rex/>

корректировку, накопление, упаковку, доставку к участку высвобождения и дозированную подачу.

Минимальная цепочка выглядит следующим образом:

локальное вещество → извлечение → переработка → фракционирование → морфологическая подготовка → накопление → упаковка → транспортировка → дозированное высвобождение → измерение распределения → оценка рабочего включения → коррекция структуры.

Эта цепочка задаёт операционную основу первого практического сценария. Если хотя бы один из её ключевых элементов отсутствует, структура остаётся не управляемой инфраструктурной средой, а разовым выбросом вещества. Особенно важно, что после стадии высвобождения необходимо оценивать не только массу выпущенного материала, но и долю вещества, реально вошедшего в рабочий профиль с допустимой концентрацией, размерным составом, фазовой и векторной согласованностью.

Этап II. Размерная и морфологическая подготовка рабочей фракции

Требование к рабочей фракции

В теоретической части работы было принято различие трёх уровней размерного диапазона частиц:

$d_p \sim 1\text{--}100$ мкм — как широкий естественный и наблюдательный ориентир;

$d_p \sim 10\text{--}100$ мкм — как рабочий инженерный диапазон;

$d_p \sim 50\text{--}70$ мкм — как узкий расчётный диапазон первого сценария.

Для настоящей главы это различие имеет прямое технологическое значение. Производственно-логистический узел должен не просто получить «пыль», а выделить именно ту фракцию, которая соответствует выбранному рабочему режиму. Поэтому фракционирование является не вспомогательной операцией, а центральным элементом формирования структуры.

При этом диапазон 10–100 мкм не должен пониматься как требование одинаково проверять все размеры частиц внутри этого интервала. Он используется как инженерная рамка чувствительности, позволяющая оценивать влияние размера на долговечность, управляемость, эрозионную цену и устойчивость структуры. Практический сценарий должен уточнять целевую рабочую фракцию. В настоящей версии для первого расчётного примера используется диапазон 50–70 мкм как удобный узкий интервал для проверки массы, подачи, накопления и рабочего включения вещества. В дальнейшем целевая фракция может быть уточнена и смещена, например к диапазону порядка 40–80 мкм или 40–90 мкм, если расчёты и экспериментальные проверки покажут преимущества такого режима. Следовательно, практической проверке подлежит не весь диапазон 10–100 мкм, а конкретная целевая рабочая фракция, её допустимый разброс, форма, состав, морфологическая однородность и коэффициент рабочего включения в профиль структуры.

Если исходное вещество содержит широкий набор размеров, то только часть массы будет пригодна для выбранного режима. Пусть M_{raw} — масса исходного вещества, поступающего на переработку, а η_{frac} — доля вещества, которая после переработки попадает в рабочий диапазон 50–70 мкм. Тогда масса рабочей фракции может быть записана как:

$$M_{\text{work}} = \eta_{\text{frac}} \cdot M_{\text{raw}}$$

или, если задана требуемая масса рабочей фракции:

$$M_{\text{raw}} = M_{\text{work}} / \eta_{\text{frac}},$$

где:

- M_{work} (working fraction mass) — масса вещества, попавшего в выбранный рабочий диапазон размеров после фракционирования;
- M_{raw} (raw material mass) — масса исходного сырья, поступившего на переработку;
- η_{frac} (fraction yield coefficient) — коэффициент выхода рабочей фракции, показывающий долю исходного сырья, попадающую в требуемый размерный диапазон после переработки и разделения.

Эта запись важна для практической части. Она показывает, что масса вещества, которую необходимо добыть или переработать, может существенно превышать массу вещества, фактически вводимого в структуру. Если η_{frac} мал, то производственно-логистический узел должен перерабатывать значительно больший объём сырья, чем масса рабочего участка. Поэтому оценка M_{struct} в следующих главах должна пониматься как масса уже подготовленной рабочей фракции, а не как полная масса добытого материала.

Однако размерный отбор является только первым технологическим фильтром. После выделения фракции 50–70 мкм необходимо дополнительно оценивать морфологическую пригодность частиц: их форму, шероховатость, прочность, плотность и характер взаимодействия с защитной поверхностью аппарата. Поэтому масса M_{work} обозначает не окончательно готовое вещество структуры, а только размерно пригодную фракцию, которая должна пройти следующий этап подготовки.

Часть вещества после переработки будет отбракована. Слишком мелкая фракция не должна становиться основой первого участка, поскольку она сильнее подвержена радиационному давлению, эффекту Пойнтинга-Робертсона, зарядовым и плазменным процессам. Слишком крупная фракция повышает энергию единичного столкновения и требования к защите аппарата. Нежелательная по форме, плотности, прочности или характеру разрушения фракция может оказаться морфологически непригодной для формирования повторяемого рабочего профиля и поэтому должна исключаться из рабочей фракции на этапе подготовки. Поэтому технологическая задача состоит не только в измельчении вещества, но и в получении контролируемого распределения частиц. Для первого расчётного сценария это означает выделение диапазона:

$$50 \text{ мкм} \leq d_p \leq 70 \text{ мкм}$$

с ограничением доли частиц за пределами этого диапазона.

В общем виде требование можно записать как:

$$M_{50-70} / M_{\text{work}} \geq \eta_{\text{size}},$$

где:

- M_{50-70} (50–70 μm fraction mass) — масса частиц, находящихся в расчётном диапазоне размеров 50–70 мкм;
- M_{work} (working fraction mass) — масса подготовленной рабочей фракции после размерного отбора;
- η_{size} (size conformity coefficient) — минимально допустимая доля частиц рабочей фракции, попадающих в расчётный диапазон размеров;
- $M_{50-70} / M_{\text{work}}$ (size conformity ratio) — фактическая доля частиц рабочей фракции, находящихся в диапазоне 50–70 мкм.

Эта формула не задаёт конкретного нормативного значения η_{size} , но фиксирует сам принцип: рабочая фракция должна оцениваться не только по средней величине d_p , но и по доле частиц, действительно находящихся в допустимом диапазоне.

В дальнейшем этот критерий должен рассматриваться вместе с коэффициентом рабочего включения. Даже если фракция подготовлена правильно по размеру, часть вещества может не попасть в рабочий профиль из-за ошибок высвобождения, поперечного разброса, фазового расхождения, потерь при транспортировке или локальных переуплотнений. Поэтому размерный критерий отвечает на вопрос, насколько подготовленная масса соответствует требуемой фракции, а коэффициент рабочего включения — на вопрос, какая часть этой массы действительно стала частью структуры.

Морфология частиц и эрозионная цена

Для первого расчётного сценария принимается диапазон 50–70 мкм, однако, как было показано в предыдущей главе, стратегической целью остаётся получение экспериментально подтверждённой морфологически однородной рабочей фракции. Размерный отбор сам по себе недостаточен: частицы одинакового размера могут по-разному воздействовать на защитную поверхность аппарата в зависимости от формы, шероховатости, плотности, прочности и характера разрушения при ударе.

Поэтому производственно-логистический узел должен управлять не только размером частиц, но и их морфологической пригодностью. Механическое дробление минерального вещества может давать остроугольные, шероховатые и микротрещиноватые частицы. Такая фракция может быть пригодна по размеру, но неблагоприятна с точки зрения эрозионного воздействия, износа накопителей, упаковки и повторяемости дозированной подачи.

В качестве технологического аналога могут рассматриваться абразивно-струйные, жидкостно-абразивные, виброабразивные, галтовочные или иные методы округления и сглаживания фракции. Их задача состоит не в получении идеальных сфер, а в снижении доли остроугольных и чрезмерно шероховатых частиц. Это уменьшает износ накопителей, снижает риск повреждения при подаче и делает взаимодействие с аппаратом более предсказуемым. В космическом исполнении такая технология должна быть замкнутой, автономной и адаптированной к вакууму, малой гравитации и ограниченному обслуживанию.

В первом приближении можно ввести коэффициент морфологической пригодности:

$$\eta_{morph} = M_{morph} / M_{work},$$

где:

M_{morph} (morphologically suitable mass) — масса частиц, удовлетворяющих требованиям по форме, прочности, плотности и допустимому характеру взаимодействия с аппаратом;

• M_{work} (working fraction mass) — масса вещества, попавшего в выбранный рабочий диапазон размеров после фракционирования;

• η_{morph} (morphological suitability coefficient) — коэффициент морфологической пригодности, показывающий долю рабочей фракции, сохранившую требуемые эксплуатационные свойства после подготовки и отбора.

Тогда масса вещества, пригодного для подачи в структуру, может быть записана как:

$$M_{ready} = \eta_{morph} * M_{work}$$

или через исходное сырьё:

$$M_{\text{ready}} = \eta_{\text{frac}} * \eta_{\text{morph}} * M_{\text{raw}}$$

где:

- M_{ready} (ready-to-release mass) — масса вещества, пригодного для дозированной подачи в структуру после завершения размерного и морфологического отбора;
- M_{work} (working fraction mass) — масса вещества, попавшего в выбранный рабочий диапазон размеров после фракционирования;
- M_{raw} (raw material mass) — масса добытого или поступившего на переработку сырья;
- η_{frac} (fraction yield coefficient) — коэффициент выхода рабочей фракции, показывающий долю исходного сырья, попадающую в требуемый размерный диапазон;
- η_{morph} (morphological suitability coefficient) — коэффициент морфологической пригодности, показывающий долю рабочей фракции, сохраняющую требуемые эксплуатационные свойства после подготовки.

Эта запись показывает, что рабочая масса структуры не равна автоматически массе добытого вещества. Между добычей и высвобождением возникает технологический фильтр. Чем жёстче требования к размеру и морфологии, тем меньше доля исходного вещества, напрямую пригодная для структуры, и тем выше требования к производительности узла.

Морфологическая подготовка может включать не только дробление, но и сглаживание острых граней, удаление чрезмерно хрупких частиц, сортировку по плотности, отбор по электрическим или механическим свойствам, а также повторную переработку нежелательной фракции. В настоящей версии эти операции не рассматриваются как готовые технологии. Они задают перечень функций, которые должны быть реализованы в будущем производственно-логистическом узле.

Важно подчеркнуть, что отбраковка части вещества не означает его полной потери. Неподходящие фракции могут использоваться для иных задач: радиационной защиты, балластной массы, упаковки, экранирования, строительных элементов, сырья для других производственных процессов или пополнения менее чувствительных участков структуры. Однако в первом расчётном сценарии они не должны автоматически включаться в рабочую фракцию 50–70 мкм и тем более не должны учитываться как вещество, вошедшее в рабочий профиль структуры. Для расчёта первого участка это различие должно быть зафиксировано как отдельная последовательность переходов массы в производственно-логистическом цикле. Только последняя величина определяет фактический вклад в сформированную структуру.

Четыре уровня массы в производственно-логистическом цикле

Для первого расчётного сценария необходимо различать четыре уровня массы вещества.

M_{raw} (raw material mass) — масса добытого или поступившего на переработку сырья.

M_{work} (working fraction mass) — масса вещества, попавшего в выбранный размерный диапазон после фракционирования.

M_{ready} (ready-to-release mass) — масса вещества, сохранившая требуемые морфологические свойства и пригодная для дозированной подачи в структуру.

M_{profile} (profile mass) — масса вещества, которая после высвобождения фактически вошла в рабочий профиль структуры и участвует в формировании её эксплуатационных свойств.

Тогда общий путь вещества можно представить как последовательность:

$$M_{\text{raw}} \rightarrow M_{\text{work}} \rightarrow M_{\text{ready}} \rightarrow M_{\text{profile}}.$$

Каждый переход между этими уровнями связан с собственными потерями и технологическими ограничениями. Поэтому масса вещества, реально работающего в структуре, может существенно отличаться от массы исходного сырья. В последующих разделах именно такое разделение будет использоваться при оценке накопления, подачи, рабочего включения и общей потребности в веществе.

Этап III. Локальное накопление подготовленной фракции

После получения и морфологической подготовки рабочей фракции возникает задача накопления. Дисперсная структура не должна формироваться как единичный случайный выброс вещества. Для получения контролируемой среды производственно-логистический узел должен иметь возможность накапливать подготовленную фракцию до тех пор, пока не будет достигнута масса, достаточная для очередного цикла подачи.

Накопление является первым самостоятельным этапом после подготовки вещества. Оно отвечает на вопрос, какую массу рабочей фракции можно удерживать в области работ до момента передачи в упаковочную, транспортную или дозирующую систему. Без накопления производственный узел был бы вынужден подавать вещество сразу после переработки, что несовместимо с дозированным формированием протяжённого участка.

Пусть $M_{\text{release,cycle}}$ — масса подготовленного вещества, высвобождаемая за один рабочий цикл формирования или пополнения структуры. Тогда минимальная масса подготовленного вещества в накопителе перед циклом должна удовлетворять условию:

$$M_{\text{stock}} \geq M_{\text{release,cycle}}$$

где:

- M_{stock} (stored mass) — масса подготовленной рабочей фракции, доступная в накопителе;
- $M_{\text{release,cycle}}$ (released mass per cycle) — масса вещества, высвобождаемая за один рабочий цикл формирования структуры.

С учётом резерва:

$$M_{\text{stock}} \geq K_{\text{reserve}} * M_{\text{release,cycle}},$$

где K_{reserve} (reserve coefficient) — коэффициент резерва, учитывающий потери, неравномерность подачи, возможную отбраковку, аварийные режимы и необходимость коррекции распределения.

Если за период формирования участка требуется N_{cycle} рабочих циклов, то суммарная масса подготовленной фракции должна быть не меньше:

$$M_{\text{ready,total}} \geq N_{\text{cycle}} * M_{\text{release,cycle}},$$

или с учётом резерва:

$$M_{\text{ready,total}} \geq K_{\text{reserve}} * N_{\text{cycle}} * M_{\text{release,cycle}}.$$

где:

$M_{ready,total}$ (total prepared mass) — суммарная масса подготовленной рабочей фракции, необходимая на весь период формирования участка;

N_{cycle} (number of cycles) — число рабочих циклов формирования структуры.

Однако для структуры важна не только масса высвобождения, а масса, реально вошедшая в рабочий профиль:

$$M_{profile,cycle} = \eta_{work} * M_{release,cycle}.$$

где:

- $M_{profile,cycle}$ (profile mass per cycle) — масса вещества, вошедшая в рабочий профиль структуры за один цикл;

- $M_{release,cycle}$ (released mass per cycle) — масса вещества, высвобождаемая за один цикл;

- η_{work} (working inclusion coefficient) — коэффициент рабочего включения, показывающий долю высвобождённого вещества, которая фактически становится частью рабочего профиля структуры.

Эти соотношения не задают окончательный масштаб первого участка. Они показывают, что практический сценарий должен учитывать не только массу вещества в самой структуре, но и массу вещества в производственном цикле: в накопителях, транспортных контейнерах, дозирующих системах и резерве обслуживания.

Накопление необходимо по нескольким причинам.

Во-первых, добыча и переработка вещества могут идти неравномерно. Производственный узел может получать сырьё партиями, перерабатывать его с переменной производительностью и сталкиваться с изменением состава материала.

Во-вторых, подача вещества в структуру должна быть дозированной. Даже если вещество произведено заранее, его нельзя просто высвободить сразу без контроля распределения. Накопитель позволяет отделить ритм переработки от ритма формирования структуры.

В-третьих, накопление создаёт эксплуатационный резерв. Если структура деградирует быстрее ожидаемого, производственно-логистический узел должен иметь возможность быстро пополнить участок, не ожидая полного нового цикла добычи и фракционирования.

В-четвёртых, накопление позволяет проверять качество фракции до её подачи. Подготовленное вещество может проходить повторное измерение, контроль размера, плотности, морфологии и электрических свойств.

Поэтому накопитель является не складом в бытовом смысле, а технологическим элементом поддержания качества среды.

Накопление для обслуживания

Вещество требуется не только для первоначального формирования структуры, но и для её обслуживания. Как было показано в теоретической части, деградация структуры означает не обязательно исчезновение вещества, а выход параметров за пределы рабочего диапазона: изменение концентрации, рост фазового разброса, смещение частиц, изменение размерного состава, потерю векторной согласованности или локальное нарушение профиля.

Поэтому производственно-логистический узел должен иметь резерв вещества не только на создание участка, но и на его пополнение. Пусть $M_{service,profile}$ — масса

вещества, которая должна реально войти в рабочий профиль за один сервисный цикл. Тогда масса высвобождения для обслуживания определяется как:

$$M_{\text{service,release}} = M_{\text{service,profile}} / \eta_{\text{work,service}},$$

где:

- $M_{\text{service,release}}$ (service release mass) — масса вещества, которую необходимо высвободить для сервисного обслуживания структуры;
- $M_{\text{service,profile}}$ (service profile mass) — масса вещества, которая должна реально войти в рабочий профиль за один сервисный цикл;
- $\eta_{\text{work,service}}$ (service working inclusion coefficient) — коэффициент рабочего включения при обслуживании структуры.

Общий запас подготовленной фракции должен учитывать первичное формирование, обслуживание и резерв:

$$M_{\text{need}} = M_{\text{form,release}} + M_{\text{service,release}} + M_{\text{reserve}},$$

где:

- M_{need} (required mass) — общий объём подготовленной рабочей фракции, необходимый для формирования и обслуживания участка;
- $M_{\text{form,release}}$ (formation release mass) — масса высвобождения, необходимая для первичного формирования структуры;
- $M_{\text{service,release}}$ (service release mass) — масса высвобождения, необходимая для обслуживания структуры;
- M_{reserve} (reserve mass) — технологический и аварийный резерв вещества.

Если обслуживание задаётся как доля от массы структуры, можно записать:

$$M_{\text{service,profile}} = k_{\text{service}} * M_{\text{struct}}$$

и тогда:

$$M_{\text{service,release}} = k_{\text{service}} * M_{\text{struct}} / \eta_{\text{work,service}}.$$

где:

- $M_{\text{service,profile}}$ (service profile mass) — масса вещества, которая должна войти в рабочий профиль за один сервисный цикл;
- M_{struct} (structure mass) — масса вещества в рабочем профиле структуры;
- k_{service} (service coefficient) — доля массы структуры, требующая восполнения за один цикл обслуживания.
- $\eta_{\text{work,service}}$ (service working inclusion coefficient) — коэффициент рабочего включения при обслуживании.

В последующих главах можно будет рассматривать ориентировочный диапазон k_{service} , но в настоящей главе важно зафиксировать сам принцип: масса вещества для структуры не исчерпывается массой первичного формирования. Инфраструктурная постановка требует поддержания рабочего режима, а значит — регулярного или периодического пополнения.

Накопление для обслуживания должно быть отделено от накопления для первичного формирования. Если весь запас расходуется на создание участка, структура становится уязвимой к ранней деградации. Поэтому производственно-логистический узел должен иметь минимальный сервисный запас, позволяющий корректировать распределение до завершения нового цикла переработки сырья.

Этап IV. Упаковка и удержание дисперсного вещества

После получения и накопления рабочей фракции возникает задача упаковки. Вещество должно быть доставлено из зоны переработки в область дозированного

высвобождения. При этом оно не должно преждевременно рассеиваться, загрязнять рабочие зоны, терять фракционный состав, электрически слипаться, образовывать нежелательные агрегаты или неконтролируемо попадать в траектории аппаратов.

Под упаковкой в настоящей работе понимается не обязательно жёсткая оболочка или одноразовый контейнер. Это может быть любой способ временного удержания подготовленной фракции в управляемом состоянии до момента её дозированной подачи. Упаковка может быть механической, контейнерной, кассетной, капсульной, порционной, электростатически стабилизированной или комбинированной. Конкретная технология в настоящей версии не выбирается.

Минимальные функции упаковки следующие:

- удержание вещества до момента подачи;
- сохранение фракционного состава;
- предотвращение преждевременного рассеяния;
- защита от загрязнения и нежелательной агрегации;
- совместимость с транспортным аппаратом;
- совместимость с дозирующим механизмом;
- возможность порционной подачи;
- учёт массы упаковки в общей логистике.

Если M_{work} — масса вещества в одной порции, а M_{pack} — масса упаковки, контейнера или удерживающей системы, то можно ввести коэффициент упаковочной массы:

$$K_{pack} = M_{pack} / M_{work}$$

Тогда полная масса транспортируемой порции:

$$M_{portion} = M_{work} + M_{pack}$$

или:

$$M_{portion} = M_{work} * (1 + K_{pack}).$$

где:

- K_{pack} (packing coefficient) — коэффициент упаковки, показывающий отношение массы упаковочных и удерживающих элементов к массе рабочей фракции;
- M_{pack} (packing mass) — масса упаковочных, удерживающих и вспомогательных элементов, необходимых для хранения, транспортировки и дозированной подачи вещества;
- M_{work} (working fraction mass) — масса рабочей фракции, предназначенной для транспортировки и последующего высвобождения;
- $M_{portion}$ (portion mass) — полная масса транспортируемой порции вещества вместе с упаковкой и удерживающими элементами.

Такое отношение упаковочной массы позволяет учитывать дополнительную массу инфраструктурных элементов, необходимую для накопления, транспортировки и контролируемой подачи дисперсного вещества. При $K_{pack} = 0$ транспортируется только рабочая фракция. При $K_{pack} > 0$ полная масса транспортируемой порции превышает массу полезного вещества, что должно учитываться при оценке производительности производственно-логистического узла и потребности в транспортных операциях.

Из приведённых соотношений следует, что транспортируемая масса определяется не только количеством рабочей фракции, но и массой упаковочных и удерживающих элементов. При уменьшении размера порции относительная доля упаковочной массы может возрасти, тогда как увеличение порции позволяет снизить её вклад в общую массу. Поэтому при проектировании первого участка необходимо искать компромисс между точностью дозированной подачи и эффективностью транспортировки вещества.

Упаковка также связана с безопасностью. Вещество, предназначенное для формирования структуры, не должно случайно попадать в нерасчётные области. Поэтому до момента высвобождения оно должно оставаться связанным с контейнером, кассетой или транспортным аппаратом. Это особенно важно для ранних этапов, когда параметры структуры ещё не отработаны и риск нештатного распределения вещества выше.

Варианты локальных накопителей и удерживающих систем

Перечисленные ниже варианты не рассматриваются как готовые инженерные решения и не имеют одинаковой степени проработанности. На данном этапе они приводятся как возможные классы накопительных и удерживающих систем, потенциально пригодных для дальнейшего анализа. Их задача состоит не в выборе конкретной конструкции, а в определении диапазона решений, которые в принципе могут обеспечивать хранение, упаковку и дозированную подачу значительных масс дисперсного вещества в области работ. Выбор конкретного варианта требует отдельной инженерной проработки и выходит за рамки настоящей постановочной работы.

Для первого рассмотрения предпочтительны не жёсткие контейнеры, постоянно доставляемые с Земли, а локально разворачиваемые или локально обслуживаемые накопители. Такие системы потенциально позволяют хранить и подавать значительные массы подготовленной дисперсной фракции без необходимости создавать тяжёлые жёсткие бункеры большого объёма. Возможность изготовления полимерных элементов в космосе уже имеет экспериментальную основу; первые демонстрации полимерной 3D-печати на орбите и последующие работы по производству в космосе показывают, что локальное изготовление полимерных или композитных элементов не является чисто теоретической идеей. Однако масштабные накопители для главного пояса астероидов требуют отдельной инженерной проработки.

В качестве основных вариантов для первого анализа могут рассматриваться гибкие полимерные плёночные накопители, многослойные армированные гибкие накопители и полугибкие силикатно-композитные оболочки. Гибкие плёночные накопители имеют преимущество малой массы оболочки относительно возможного объёма хранения. Армированные варианты позволяют повысить стойкость к механическим повреждениям, зарядовым эффектам и нагрузкам при заполнении. Силикатно-композитные или иные неорганические оболочки интересны тем, что могут быть устойчивее к радиации и ультрафиолетовой деградации, чем простые органические плёнки.

Эти варианты не требуют в настоящей версии выбора конкретного материала. Для постановочной работы важно зафиксировать сам класс решений: накопитель должен быть достаточно лёгким, масштабируемым, совместимым с дозированной подачей и пригодным для обслуживания в области работ. Если часть материалов для оболочек, армирования или ремонта может создаваться локально, это усиливает инфраструктурную логику сценария.

Вспомогательными или специальными вариантами могут быть полости в малых телах, насыпные или слабо удерживаемые массы, а также электростатическое, магнитное или комбинированное полевое удержание. Полости в малых телах теоретически дают большой естественный объём хранения, но требуют вмешательства в механическую структуру тела и могут создавать риски фрагментации или неконтролируемого выброса материала. Насыпные массы без полной оболочки могут быть допустимы только для отдельных видов вещества и требуют отдельного анализа потерь и управляемости. Полевое удержание может быть полезно для металлической, железосодержащей или управляемо заряженной фракции, но не рассматривается здесь как базовое решение для хранения больших масс из-за требований к энергетике, устойчивости поля и взаимодействию с плазменной средой.

Следовательно, для первого расчётного рассмотрения наибольший интерес представляют гибкие и полугибкие накопительные системы, поскольку они лучше соответствуют требованиям масштабируемости, локального обслуживания и дозированной подачи вещества. Остальные варианты могут рассматриваться как специальные или вспомогательные решения и требуют отдельного анализа применимости.

Этап V. Транспортировка и дозированная подача

Производственно-логистический узел не обязательно должен находиться непосредственно внутри будущего участка дисперсной структуры. Более вероятна схема, при которой добыча, переработка, накопление и упаковка происходят около базового или сырьевого тела, а дозированное высвобождение выполняется специализированными транспортно-дозирующими аппаратами.

Такой аппарат должен выполнять несколько функций:

- принимать подготовленную порцию вещества;
- доставлять её в расчётную область высвобождения;
- сохранять вещество в управляемом состоянии до момента подачи;
- двигаться по траектории, согласованной с будущей структурой;
- высвобождать вещество с заданной скоростью и направлением;
- измерять локальное распределение после подачи;
- при необходимости выполнять корректирующий проход.

Пусть $M_{\text{carrier,release}}$ — масса вещества, которую один транспортно-дозирующий аппарат может доставить и высвободить за один цикл. Тогда масса, реально вошедшая в рабочий профиль после одного такого цикла, может быть записана как:

$$M_{\text{carrier,profile}} = \eta_{\text{work}} * M_{\text{carrier,release}}$$

Если требуется получить рабочую массу профиля $M_{\text{total,profile}}$, то число циклов одного аппарата можно оценить как:

$$N_{\text{cycle}} = M_{\text{total,profile}} / M_{\text{carrier,profile}}$$

Если одновременно работает группа из N_{carrier} аппаратов, то число групповых циклов:

$$N_{\text{group_cycle}} = M_{\text{total,profile}} / (N_{\text{carrier}} * M_{\text{carrier,profile}})$$

где:

$M_{\text{carrier,release}}$ (carrier release mass) — масса вещества, высвобождаемая одним аппаратом за один рабочий цикл;

- $M_{\text{carrier,profile}}$ (carrier profile mass) — масса вещества от одного аппарата, которая после высвобождения фактически входит в рабочий профиль структуры за один цикл;

- η_{work} (working inclusion coefficient) — коэффициент рабочего включения, показывающий долю высвобождённого вещества, реально вошедшую в рабочий профиль;

- $M_{\text{total,profile}}$ (total profile mass) — суммарная масса вещества, которую необходимо сформировать в рабочем профиле структуры;

- N_{cycle} (number of cycles) — число рабочих циклов, необходимое для формирования требуемой массы профиля одним аппаратом;

- N_{carrier} (number of carriers) — количество одновременно работающих аппаратов-носителей;

- $N_{\text{group_cycle}}$ (number of group cycles) — число циклов, необходимое для формирования требуемой массы профиля при совместной работе группы аппаратов.

Эти формулы будут использованы в последующих главах при оценке числа рабочих циклов и срока формирования участка. В настоящей главе важно зафиксировать сам принцип: структура формируется не массой, покинувшей аппарат, а массой, вошедшей в рабочий профиль после серии контролируемых транспортно-дозировующих проходов.

Транспортировка вещества к зоне высвобождения должна быть связана с орбитальной динамикой. Аппарат не просто “долетает до точки” и выпускает пыль. Он должен вводить вещество в такой режим, при котором частицы получают согласованные орбитальные параметры и не превращаются в хаотическое облако. Поэтому транспортно-дозировующий аппарат должен рассматриваться как часть механизма формирования векторной и фазовой согласованности структуры.

Дозированное высвобождение вещества

Дозированное высвобождение является ключевой операцией формирования структуры. Именно на этой стадии подготовленная фракция переходит из состояния запасённого материала в состояние рабочей дисперсной среды.

Простейшая логика “высыпать вещество в космос” для рассматриваемого подхода неприемлема. Если вещество высвобождается без контроля скорости, направления, плотности и времени подачи, оно образует не инфраструктурную среду, а неконтролируемое распределение частиц. Поэтому высвобождение должно быть дозированным, повторяемым и измеряемым.

Параметры высвобождения должны включать:

- массу вещества за единицу времени;
- скорость выхода частиц из дозирующего устройства;
- направление высвобождения;
- длительность подачи;
- распределение вещества вдоль траектории;
- допустимый поперечный разброс;
- фазовый разброс частиц после подачи;
- соответствие полученного распределения требуемой плотности ρ_{dust} .

Если $\dot{M}_{\text{feed}}$ — массовый расход подачи вещества, а T_{feed} — время подачи за один цикл, то масса, высвобожденная за цикл, может быть записана как:

$$M_{\text{release,cycle}} = \dot{M}_{\text{feed}} * T_{\text{feed}}$$

Однако эта величина ещё не равна массе, вошедшей в рабочий профиль. С учётом коэффициента рабочего включения:

$$M_{\text{profile,cycle}} = \eta_{\text{work}} * M_{\text{release,cycle}}$$

Если требуется сформировать суммарную рабочую массу профиля $M_{\text{total,profile}}$, то время чистой подачи в первом приближении:

$$T_{\text{feed,total}} = M_{\text{total,profile}} / (\eta_{\text{work}} * \dot{M}_{\text{feed}})$$

где:

- $\dot{M}_{\text{feed}}$ (feed mass flow rate) — массовый расход подачи вещества;
- T_{feed} (feed time) — время подачи вещества за один рабочий цикл;
- $M_{\text{release,cycle}}$ (released mass per cycle) — масса вещества, высвобождаемая за один цикл подачи;
- η_{work} (working inclusion coefficient) — коэффициент рабочего включения, показывающий долю высвобождённого вещества, фактически вошедшую в рабочий профиль структуры;
- $M_{\text{profile,cycle}}$ (profile mass per cycle) — масса вещества, вошедшая в рабочий профиль структуры за один цикл;
- $M_{\text{total,profile}}$ (total profile mass) — суммарная масса вещества, которую необходимо сформировать в рабочем профиле структуры;
- $T_{\text{feed,total}}$ (total feed time) — суммарное время подачи, необходимое для формирования требуемой массы рабочего профиля.

Эти соотношения связывают производительность системы подачи с темпом формирования структуры. При фиксированном массовом расходе уменьшение коэффициента рабочего включения приводит к увеличению времени формирования участка, поскольку большая часть высвобождённого вещества не попадает в рабочий профиль и требует дополнительных циклов подачи или последующей коррекции распределения.

Однако это время не равно полному сроку формирования участка. К нему добавляются время добычи, переработки, фракционирования, накопления, упаковки, перелёта транспортно-дозирующих аппаратов, измерения результата и коррекции распределения. Поэтому в дальнейших главах срок формирования должен оцениваться через эффективную производительность всей цепочки, а не только через расход дозатора.

Дозированное высвобождение должно быть связано с обратной связью. После подачи вещества необходимо измерить фактическое распределение: плотность, поперечный профиль, фазовый разброс, отклонение от расчётной траектории, наличие локальных переуплотнений и зон недостаточной концентрации. Если параметры не соответствуют рабочему диапазону, структура должна корректироваться дополнительными проходами или перераспределением вещества.

Таким образом, высвобождение вещества является не финальной операцией, а частью цикла:

подача → измерение → сравнение с расчётным профилем → коррекция → повторная подача.

Именно эта цикличность отличает инфраструктурную структуру от разового облака пыли.

Связь накопления и подачи с геометрией участка

Масса вещества, которую необходимо накопить и подать, определяется геометрией рабочего участка и требуемой плотностью среды. Если V_{active} — активный объём участка, а ρ_{dust} — целевая массовая плотность среды, то масса вещества в рабочей структуре:

$$M_{\text{struct}} = \rho_{\text{dust}} * V_{\text{active}}$$

Здесь M_{struct} следует понимать как массу вещества, находящуюся в рабочем профиле структуры, а не как полную массу вещества, которую необходимо добыть, переработать или высвободить. С учётом технологических коэффициентов полная сырьевая и высвобождаемая масса может быть больше:

$$M_{\text{release,total}} = M_{\text{struct}} / \eta_{\text{work}},$$

$$M_{\text{raw,total}} = M_{\text{struct}} / (\eta_{\text{frac}} * \eta_{\text{morph}} * \eta_{\text{work}}).$$

Эти записи показывают, что геометрическая масса рабочего участка является только одним уровнем оценки. Для производственно-логистического узла необходимо дополнительно учитывать выход рабочей фракции, морфологическую пригодность, потери упаковки, доставки и долю вещества, реально вошедшую в профиль.

Для цилиндрического приближения активного участка:

$$V_{\text{active}} = \pi * r^2 * L,$$

Тогда:

$$M_{\text{struct}} = \rho_{\text{dust}} * \pi * r^2 * L$$

Эта формула будет подробно использована в следующей главе при оценке минимального участка структуры. В настоящей главе она нужна для понимания связи между веществом и логистикой: производственно-логистический узел должен накопить и подать не абстрактную массу, а массу, определяемую выбранной геометрией, плотностью и длиной участка.

Если структура формируется не вся сразу, а по сегментам, то масса одного сегмента:

$$M_{\text{segment}} = \rho_{\text{dust}} * \pi * r^2 * L_{\text{segment}}$$

а число сегментов:

$$N_{\text{segment}} = L / L_{\text{segment}}$$

Тогда суммарная масса:

$$M_{\text{struct}} = N_{\text{segment}} * M_{\text{segment}}$$

где:

- M_{struct} (structure mass) — масса вещества, находящаяся в рабочем профиле структуры;
- ρ_{dust} (dust mass density) — целевая массовая плотность дисперсной среды в рабочем профиле;
- V_{active} (active volume) — активный объём рабочего участка структуры;
- $M_{\text{release,total}}$ (total release mass) — суммарная масса вещества, которую необходимо высвободить для формирования рабочего профиля;

- $M_{\text{raw,total}}$ (total raw material mass) — суммарная масса исходного сырья, необходимая для формирования структуры с учётом потерь на всех этапах подготовки и подачи;
- η_{frac} (fraction yield coefficient) — коэффициент выхода рабочей фракции;
- η_{morph} (morphological suitability coefficient) — коэффициент морфологической пригодности;
- η_{work} (working inclusion coefficient) — коэффициент рабочего включения, показывающий долю высвобождённого вещества, фактически вошедшую в рабочий профиль структуры;
- r (structure radius) — расчётный радиус рабочего участка;
- L (structure length) — расчётная длина рабочего участка;
- M_{segment} (segment mass) — масса вещества в одном сегменте структуры;
- L_{segment} (segment length) — длина отдельного сегмента структуры;
- N_{segment} (number of segments) — число сегментов, на которые разбивается участок при последовательном формировании.

Эти соотношения связывают геометрию рабочего участка с потребностью в веществе и производственно-логистическими требованиями. При этом масса вещества в рабочем профиле представляет собой лишь один уровень оценки. Реальная потребность в высвобождаемом веществе и исходном сырье определяется также потерями на фракционировании, морфологической подготовке и рабочем включении. Представление структуры в виде набора сегментов позволяет перейти от одновременного формирования всего участка к последовательной сборке, измерению и коррекции отдельных частей рабочего профиля.

Такое представление удобно для первого практического сценария. Оно позволяет не требовать одновременного формирования всего участка длиной L , а рассматривать последовательную сборку из сегментов. Каждый сегмент может быть сформирован, измерен, скорректирован и затем связан с соседним сегментом.

Сегментный подход снижает риск первого развёртывания. Если отдельный сегмент сформирован неудачно, корректируется не весь участок, а ограниченная часть. Кроме того, сегментация позволяет постепенно наращивать инфраструктуру: сначала формируется короткий проверочный участок, затем более длинный минимальный участок, затем рабочий участок с обслуживанием.

Этап VI. Измерение, обратная связь и корректировка профиля

Локальное накопление, упаковка и подача вещества не имеют смысла без измерения результата. Дисперсная структура задаётся не фактом внесения вещества, а достижением рабочего диапазона параметров. Поэтому после подачи необходимо проверить:

- фактическую концентрацию частиц;
- поперечный профиль распределения;
- продольную равномерность участка;
- размерный состав;
- фазовый разброс;
- векторную согласованность;
- наличие локальных переуплотнений;

- наличие пустот и разрывов;
- скорость деградации после формирования;
- долю вещества, реально вошедшую в рабочий профиль после высвобождения.

Если эти параметры не измеряются, структура не может считаться управляемой. Она остаётся распределением вещества с неизвестными свойствами. Поэтому производственно-логистический узел должен включать не только добычу, переработку и подачу, но и систему диагностики.

Именно здесь возникает практический смысл коэффициента рабочего включения. η_{work} не может быть принят только как расчётное допущение; он должен определяться через измерение фактического распределения после подачи. Если система не способна оценить, какая доля высвобожденного вещества вошла в рабочий профиль, невозможно корректно рассчитать массу следующего прохода, число циклов и запас вещества для обслуживания.

Минимальный цикл управления структурой можно записать так:

измерение → сравнение → коррекция → повторное измерение

или в связке с подачей:

подача → измерение → сравнение с целевым профилем → корректирующая подача → повторное измерение.

Это означает, что транспортно-дозировочные аппараты и диагностические аппараты могут быть как отдельными системами, так и разными режимами работы одного аппарата. В первом случае одни аппараты высвобождают вещество, а другие измеряют результат. Во втором случае один аппарат после подачи выполняет диагностику участка или передаёт данные системе мониторинга.

Обратная связь особенно важна на раннем этапе, когда параметры структуры ещё не подтверждены. Первый участок должен формироваться не в режиме “рассчитать и забыть”, а в режиме последовательного уточнения: подать ограниченную массу, измерить результат, скорректировать параметры подачи, подать следующую порцию.

Ограничения настоящей постановки

Настоящая глава не задаёт конкретный проект добывающего комплекса, конкретный тип дробилки, сепаратора, накопителя, контейнера или дозатора. Такая детализация выходит за рамки версии 1.2 и должна относиться к следующим этапам исследования.

В настоящей версии также не выбирается конкретный астероид, конкретное месторождение, конкретный химический состав вещества или конкретная технология переработки. Причина состоит в том, что выбор конкретного тела потребовал бы отдельной модели: орбитальной доступности, состава, механической структуры, рисков фрагментации, энергетики операций, устойчивости размещения оборудования и безопасности работ.

Поэтому глава 21 решает более узкую задачу. Она показывает, что между “наличием вещества в главном поясе” и “созданием дисперсной структуры” находится обязательная производственно-логистическая цепочка. Эту цепочку нельзя пропустить. Если вещество не извлекается, не фракционируется, не накапливается, не упаковывается, не транспортируется и не подаётся дозированно, структура не может иметь заданные параметры ρ_{dust} , d_p , L , σ_{perp} , фазовую согласованность и допустимую эрозионную цену.

Именно поэтому локальное накопление, упаковка и подача вещества должны рассматриваться как часть самого практического сценария, а не как внешняя техническая подробность. Практический сценарий становится осмысленным только тогда, когда вещество проходит полный путь от сырья до рабочей дисперсной среды.

Итог главы

Локальное вещество является ключевым условием первого рабочего инфраструктурного сценария. Если рабочая масса дисперсной структуры каждый раз доставляется с Земли, инфраструктурная логика сценария теряется. Поэтому в первом рабочем сценарии основная масса вещества должна вовлекаться в цикл формирования структуры в области работ, а с Земли должны доставляться прежде всего высокотехнологические аппараты, производственные узлы, системы переработки, фракционирования, дозирования, мониторинга и управления.

При этом для предварительного экспериментального этапа допустимо использование заранее подготовленной рабочей фракции. Такой этап может проверять физический режим среды, дозированное высвобождение, измерение распределения, взаимодействие с аппаратом и коэффициент рабочего включения без немедленного развёртывания полного астероидного производственно-логистического узла. Однако для рабочего инфраструктурного сценария локальное вещество остаётся необходимым условием масштабирования и повторяемой эксплуатации.

Рабочая фракция первого участка не равна всему естественному диапазону межпланетной пыли. В качестве широкого ориентира используется 1–100 мкм, в качестве инженерного рабочего диапазона — 10–100 мкм, а для первого расчётного сценария принимается узкая фракция 50–70 мкм. Поэтому производственно-логистический узел должен обеспечивать не просто получение пыли, а выделение и подготовку конкретной рабочей фракции.

В ходе производственно-логистического цикла происходит последовательный переход от массы сырья к массе вещества, реально вошедшего в рабочий профиль структуры, что требует учитывать потери на каждом этапе подготовки и подачи.

Поэтому итоговая потребность в сырье и подготовленной фракции должна оцениваться не только по массе рабочего профиля, но и по потерям на фракционировании, морфологической подготовке, подаче и рабочем включении.

Накопление, упаковка и дозированное высвобождение являются обязательными стадиями формирования структуры. Они позволяют отделить ритм добычи и переработки от ритма подачи, создать резерв вещества, сохранить фракционный состав, доставить порции к зоне высвобождения и вводить вещество в структуру на расчётно задаваемых условиях.

Первый участок должен формироваться не единичным выбросом, а серией контролируемых циклов:

добыча → переработка → фракционирование → накопление → упаковка → транспортировка → дозированная подача → измерение → оценка рабочего включения → коррекция.

Тем самым первый рабочий сценарий требует учитывать не только массу вещества, находящуюся в рабочем профиле структуры, но и полный производственно-логистический цикл её формирования, накопления, подачи, контроля и обслуживания. Именно этот цикл становится связующим элементом между локальным сырьём и рабочей дисперсной средой.

Поэтому практическая реализуемость первого участка определяется не только параметрами самой структуры, но и способностью производственно-логистического узла обеспечивать повторяемое прохождение всего цикла с требуемой производительностью и качеством результата.

В следующей главе эта логика применяется к расчёту минимального участка структуры: его длины, радиуса, активного объёма, плотности, массы вещества в рабочем профиле и полной массы, которую необходимо подготовить и высвободить с учётом коэффициента рабочего включения.

22. Что доставляется с Земли и что формируется локально

Перед расчётом массы первого участка необходимо отделить массу создаваемой дисперсной среды от массы оборудования, доставляемого с Земли. Без такого разделения практический сценарий может быть понят неверно: как будто для формирования первого участка требуется запустить с Земли десятки, сотни или тысячи тонн вещества. В рассматриваемой постановке это не так. С Земли должна доставляться не вся рабочая масса структуры, а технологическое ядро, способное вовлекать локальное вещество в производственно-логистический цикл.

Это различие является принципиальным. Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура не должна строиться как объект, полностью привезённый с Земли. Она должна формироваться в области работ из доступного местного вещества, а земная доставка должна обеспечивать прежде всего высокотехнологические элементы: энергетические, добывающие, перерабатывающие, фракционирующие, транспортные, дозирующие, диагностические и управляющие системы.

В этом смысле практический сценарий ближе к инфраструктурной схеме использования местных ресурсов, чем к классической схеме единичной космической миссии. NASA рассматривает использование местных ресурсов как направление, позволяющее получать воду, топливо и другие ресурсы в пункте назначения, а не доставлять все необходимые запасы с Земли¹⁷. В настоящей работе этот принцип применяется к формированию рабочей дисперсной среды, производству расходного вещества и потенциальному обеспечению многоразовых рабочих циклов аппаратов.

При этом необходимо различать предварительный экспериментальный этап и первый рабочий инфраструктурный сценарий. Для ранней лабораторной, околоземной или иной ограниченной проверки может использоваться заранее подготовленная рабочая фракция, доставленная с Земли. Такая проверка нужна для оценки физического режима среды, дозированного высвобождения, взаимодействия с аппаратом, измерения распределения и коэффициента рабочего включения. Однако для первого рабочего инфраструктурного сценария во внутренней части главного пояса астероидов базовая логика иная: основная рабочая масса должна вовлекаться в цикл локально, иначе сценарий теряет

¹⁷ NASA In-Situ Resource Utilization (ISRU) Overview (**Использование местных ресурсов in situ**). Источник используется как подтверждение принципа получения и использования ресурсов непосредственно в районе эксплуатации космической инфраструктуры вместо их полной доставки с Земли.

<https://www.nasa.gov/mission/in-situ-resource-utilization-isru/>

инфраструктурный смысл и превращается в последовательность дорогостоящих доставок расходного вещества.

Две разные массы: технологическое ядро и рабочее вещество

В первом расчётном сценарии необходимо различать две категории массы.

Первая категория — масса технологического ядра, доставляемого с Земли. К ней относятся сложные аппараты, узлы, системы управления, энергетические модули, приборы диагностики, дозирующие устройства, транспортные аппараты и критические компоненты, которые невозможно или нецелесообразно изготавливать на месте на начальном этапе.

Вторая категория — масса рабочего вещества, формируемого локально. К ней относится дисперсная фракция, используемая для создания структуры, а также вещество для пополнения, коррекции, обслуживания, защитных элементов, балластных функций и возможного производства топлива или рабочего тела.

Эти массы нельзя складывать в одну простую величину как “массу, которую надо привезти с Земли”. Если первый участок требует десятки или сотни тонн рабочей фракции, это не означает, что вся эта масса должна быть доставлена с Земли. Напротив, смысл производственно-логистического узла состоит в том, чтобы доставленная высокотехнологическая масса многократно вовлекала местное вещество в рабочий цикл.

Схематически это можно записать так:

$$M_{\text{project}} = M_{\text{earth}} + M_{\text{local}}$$

Для инфраструктурной постановки принципиально важно, чтобы:

$$M_{\text{local}} \gg M_{\text{earth}}$$

где:

- M_{project} (project mass) — суммарная масса, вовлекаемая в проект;
- M_{earth} (Earth-delivered mass) — масса оборудования, доставляемого с Земли;
- M_{local} (locally supplied mass) — масса вещества, получаемого, перерабатываемого, накапливаемого и подаваемого из местных ресурсов в области работ;
- символ $\gg$ означает, что локально вовлекаемая масса существенно превышает массу, доставляемую с Земли.

Именно при таком соотношении появляется смысл разворачивать производственно-логистический узел. Если основная масса всё равно доставляется с Земли, структура превращается в дорогую серию транспортных операций. Если же земная доставка создаёт технологическое ядро, которое затем многократно использует местное вещество, проект приобретает инфраструктурный характер.

При этом M_{local} также не является одной простой массой. Внутри неё необходимо различать массу исходного сырья, массу подготовленной рабочей фракции, массу высвобожденного вещества и массу, реально вошедшую в рабочий профиль структуры. Поэтому последующие расчёты должны отделять геометрическую массу рабочего участка от полной массы сырья и от полной массы вещества, проходящего через производственно-логистический узел.

Что доставляется с Земли

С Земли в первом сценарии должны доставляться прежде всего системы, обладающие высокой технологической сложностью и высокой удельной

ценностью. Это не обязательно один аппарат и не обязательно единый модуль. Скорее речь идёт о первоначальном комплекте оборудования, который позволяет запустить локальный производственно-логистический цикл.

К таким системам относятся:

- энергетический модуль;
- аппараты разведки и картирования локальной области;
- аппараты сближения с базовым или сырьевым телом;
- добывающие или извлекающие устройства;
- дробильные, измельчающие или перерабатывающие узлы;
- системы фракционирования вещества;
- системы морфологической подготовки рабочей фракции;
- накопители подготовленного вещества;
- упаковочные или удерживающие системы;
- транспортно-дозирующие аппараты;
- аппараты диагностики дисперсной структуры;
- системы связи, навигации, управления и автономной коррекции;
- резервные высокотехнологические компоненты;
- начальные расходные материалы, калибровочные партии и инструменты проверки.

Этот перечень не является окончательным проектом миссии. Он показывает тип массы, которая должна доставляться с Земли. Это масса сложных функциональных систем, а не масса всей будущей дисперсной среды. Даже если отдельные элементы технологического ядра будут достаточно тяжёлыми, их роль отличается от роли рабочего вещества. Они должны не расходоваться однократно, а многократно участвовать в добыче, переработке, фракционировании, подаче, измерении рабочего включения и обслуживании структуры.

Поэтому земная доставка должна оцениваться не только по массе, но и по производственной функции. Один и тот же килограмм высокотехнологического оборудования может обеспечить многократное вовлечение местного вещества, тогда как килограмм доставленной с Земли пыли после высвобождения сразу становится расходным материалом.

Что формируется локально

Локально должна формироваться или вовлекаться основная масса вещества, не требующая доставки в готовом виде с Земли. В первую очередь это:

- рабочая дисперсная фракция 50–70 мкм;
- сырьё для повторного пополнения структуры;
- вещество для корректирующих подач;
- резервная масса для обслуживания;
- часть балластной или защитной массы;
- возможная упаковочная или вспомогательная масса;
- побочные фракции, пригодные для менее чувствительных задач;

— топливо, компоненты топлива или рабочее тело, если состав местного вещества и энергетика узла позволяют организовать их производство.

Как было показано в предыдущей главе, локальное вещество не становится рабочей средой автоматически. Оно проходит последовательность технологических переходов: от исходного сырья к размерно пригодной фракции, затем к морфологически пригодной фракции и далее к веществу, реально вошедшему в рабочий профиль структуры.

В настоящей главе это различие важно не само по себе, а для разграничения земной и локальной массы. M_{raw} , M_{work} , M_{ready} , $M_{release}$ и $M_{profile}$ должны рассматриваться как массы локального производственно-логистического цикла, а не как прямые пусковые массы с Земли.

Поэтому локальное формирование вещества не делает проект простым. Оно лишь меняет характер сложности: вместо задачи «доставить всю рабочую массу с Земли» возникает задача «доставить технологическое ядро, способное производить, высвобождать, измерять и обслуживать рабочую массу на месте».

Локальное топливо и многообразие аппаратов

Локальная ресурсная база важна не только для формирования дисперсной структуры. Она может иметь ещё одну принципиальную функцию: обеспечение топлива, рабочего тела или компонентов топлива для транспортных, дозирующих, обслуживающих и диагностических аппаратов.

Если аппараты, участвующие в формировании структуры, после каждого цикла должны заменяться новыми аппаратами, доставленными с Земли, проект сохраняет значительную зависимость от земной логистики. Если же аппараты способны возвращаться к производственно-логистическому узлу, пополнять запасы рабочего тела, проходить диагностику и снова выполнять цикл доставки или дозированной подачи, система переходит к многократной логике.

В таком случае с Земли требуется доставить аппарат и технологическое ядро, но не обязательно доставлять топливо для каждого последующего цикла. Это меняет экономику всей схемы. Аппарат становится не одноразовым носителем, а рабочей машиной локального инфраструктурного цикла.

В простейшем виде это можно выразить так:

аппарат + локальное топливо + локальное рабочее вещество -> повторяемые циклы формирования

При наличии локального источника топлива или рабочего тела транспортно-дозировующий аппарат может выполнять не один, а множество циклов:

загрузка -> перелёт -> дозированная подача -> измерение -> коррекция -> возврат -> дозаправка -> новый цикл

Именно этот переход делает миссию не просто длительной, а потенциально открытой по числу циклов. Ограничителями становятся не стартовый запас топлива с Земли, а износ аппаратов, ресурс оборудования, наличие локального сырья, производительность энергетической системы, надёжность дозаторов, качество обслуживания и способность сохранять рабочий профиль структуры.

Локальное получение топлива может иметь разные формы. В зависимости от состава доступного вещества это может быть получение воды, её электролиз на водород и кислород, получение кислорода из минеральных соединений, производство рабочего тела для электрореактивных двигателей или

использование иных локальных ресурсов. NASA в материалах по ISRU рассматривает производство топлива и других запасов из местных ресурсов как одно из ключевых направлений снижения зависимости от доставки с Земли²².

Особое значение имеет электролиз воды, если в выбранной области доступно водосодержащее вещество. В таком случае локальный производственный узел может не только готовить дисперсную фракцию, но и производить компоненты топлива или рабочего тела. В более общем виде это означает, что производственно-логистический узел может обеспечивать не только данную структуру, но и другие проекты, не связанные напрямую с первым участком: разведочные аппараты, сервисные аппараты, транспортные операции, ремонтные миссии и последующие инфраструктурные эксперименты.

Это не означает, что первый участок обязан сразу иметь полностью замкнутую топливную экономику. Для первого сценария достаточно зафиксировать принцип: если производственно-логистический узел способен получать локальное рабочее вещество и топливо, то транспортно-дозировочные аппараты могут становиться возвращаемыми и многоразовыми. Тогда проект начинает отличаться от разовой миссии не только локальным веществом для структуры, но и локальным обеспечением самих рабочих циклов.

Многоцикловый характер миссии

Если узел способен локально производить не только рабочую дисперсную фракцию, но и топливо или рабочее тело для аппаратов, миссия перестаёт быть ограниченной заранее доставленным запасом расходных материалов. В этом случае число циклов определяется не только стартовой массой, а ресурсом оборудования, скоростью локального производства, доступностью сырья, износом аппаратов, возможностью ремонта и способностью поддерживать структуру в рабочем диапазоне.

Такую схему можно назвать потенциально открытой по числу циклов:

$$N_{\text{cycles}} \leq \min(N_{\text{fuel}}, N_{\text{resource}}, N_{\text{wear}}, N_{\text{repair}}, N_{\text{control}})$$

где:

N_{cycles} (total available cycles) — максимально возможное число рабочих циклов системы;

N_{fuel} (fuel-limited cycles) — число циклов, обеспечиваемое локальным топливом или рабочим телом;

N_{resource} (resource-limited cycles) — число циклов, обеспечиваемое доступным сырьём;

N_{wear} (wear-limited cycles) — ограничение по износу аппаратов и механизмов;

N_{repair} (repair-limited cycles) — ограничение по возможности обслуживания и замены узлов;

N_{control} (control-limited cycles) — ограничение по способности сохранять управляемость структуры.

Эта запись показывает, что потенциально открытая по числу циклов система не является бесконечной. Максимальное число рабочих циклов определяется тем ограничением, которое достигается первым. Поэтому при наличии локального топлива и сырья главным фактором могут стать уже не расходные материалы, а ресурс оборудования, ремонтпригодность и способность поддерживать структуру в рабочем состоянии.

Это принципиально отличает производственно-логистический узел от объекта, который только потребляет доставленные ресурсы. Узел не просто расходует запас; он превращает местное вещество и энергию в новые рабочие циклы.

Почему сравнение с МКС полезно, но ограничено

Для понимания масштаба полезно сопоставить будущие оценки массы с Международной космической станцией. NASA указывает массу МКС 419 725 кг, то есть около 420 т; кроме того, станция имеет восемь солнечных батарей, обеспечивающих генерацию порядка 75–90 кВт электроэнергии¹⁸.

Это сравнение важно не потому, что дисперсная структура похожа на МКС. Напротив, объекты принципиально различны. МКС — это сложная обитаемая инженерная конструкция на низкой околоземной орбите, собранная из высокотехнологичных модулей, доставленных с Земли. Она имеет герметичные объёмы, системы жизнеобеспечения, стыковочные узлы, энергетическую ферму, радиаторы, научные модули, системы ориентации, связи, управления и обслуживания экипажа.

Первый участок дисперсной структуры — это не станция и не обитаемый комплекс. Его рабочая масса состоит преимущественно из простого вещества, которое должно быть получено локально. Поэтому сравнение с МКС показывает не равенство инженерной сложности, а порядок массы. Если активная область первого участка требует десятки или сотни тонн рабочей фракции, это не является планетарной массой. Это масса крупного космического инфраструктурного масштаба.

При этом различие с МКС работает в пользу рассматриваемого подхода только при одном условии: основная масса вещества должна формироваться локально. Доставить с Земли 420 т сложной конструкции на низкую околоземную орбиту и получить сотни тонн простого дисперсного вещества в области работ — это разные задачи. Первая требует многократной доставки высокотехнологичных модулей с Земли. Вторая требует развёртывания оборудования, которое вовлекает местное сырьё в рабочий цикл.

Поэтому при отработке технологий локального получения, фракционирования, подачи и измерения рабочего включения вещества задача вовлечения десятков или сотен тонн астероидного материала может быть экономически и логистически менее тяжёлой, чем доставка сопоставимой массы готовых конструкций с Земли. Это не означает, что проект становится простым. Это означает, что центр тяжести переносится с пусковой массы на автономность, производительность, ресурс оборудования, диагностику, рабочее включение и обслуживание.

Отличие от МКС как научно-технологического объекта

Сравнение с Международной космической станцией полезно не только по массе, но и по типу инфраструктуры. МКС имеет огромную научную, технологическую и международную ценность, но её основная функция не состоит в добыче местного вещества, производстве рабочей массы, создании внешней инфраструктурной среды, заправке возвращаемых аппаратов и масштабировании собственного производственного цикла.

¹⁸ NASA — International Space Station Facts and Figures — источник используется для справочного сравнения с массой и энергетикой Международной космической станции.
<https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-facts-and-figures/>

МКС можно рассматривать как дорогой научно-технологический объект, конструктивно зависимый от постоянного снабжения с Земли. Она не производит топливо, не добывает массу, не создаёт внешнюю инфраструктурную среду и не масштабирует сама себя. Её ценность в основном научная, технологическая, политическая и исследовательская.

Производственно-логистический узел в рассматриваемой постановке имеет другую целевую функцию. Он тоже является высокотехнологическим объектом, но его задача состоит не только в проведении исследований. Он должен вовлекать местное вещество в повторяемый цикл: добывать, перерабатывать, фракционировать, накапливать, дозировать, подавать, измерять, корректировать и обслуживать структуру. Если к этому добавляется локальное производство топлива или рабочего тела, узел получает ещё одну функцию — обеспечение многоразовых аппаратов.

Поэтому экономический смысл такого узла потенциально отличается от экономического смысла МКС. МКС трудно рассматривать как прибыльный объект в прямом коммерческом смысле: её ценность в основном научная, технологическая, политическая и исследовательская. Производственно-логистический узел, напротив, может в перспективе оцениваться через инфраструктурные преимущества: снижение массы доставки с Земли, повторяемость операций, локальное производство вещества и топлива, обслуживание аппаратов, поддержка других миссий и масштабирование созданной инфраструктуры.

Это не означает, что производственно-логистический узел автоматически становится прибыльным. В настоящей работе не выполняется технико-экономическое обоснование. Однако принципиальное отличие состоит в том, что для такого узла вообще можно ставить вопрос об экономическом выигрыше: сколько массы не нужно доставлять с Земли, сколько циклов выполняет один аппарат, какова стоимость локального получения вещества, какой ресурс имеет оборудование, сколько миссий может обслужить один хаб, какая доля высвобожденной массы реально входит в рабочий профиль и как растёт эффект при масштабировании.

В этом смысле МКС и производственно-логистический узел относятся к разным типам космической инфраструктуры. МКС — это научно-технологическая станция, зависящая от земного снабжения. Производственно-логистический узел — это потенциальный производственный, топливный и сервисный хаб, который при успешной работе снижает зависимость от Земли и создаёт условия для повторяемых операций в выбранной орбитальной области.

Производственно-логистический узел как хаб

Если первый участок оказывается успешным, производственно-логистический узел перестаёт быть вспомогательным оборудованием одного эксперимента. Он становится хабом, вокруг которого могут развиваться другие операции.

Такой хаб может выполнять несколько функций.

Во-первых, он может быть сырьевым хабом. Если узел уже умеет извлекать, перерабатывать и сортировать вещество, он может обеспечивать не только дисперсную структуру, но и другие задачи, требующие массы: экранирование, балласт, защитные элементы, простые конструкционные материалы или расходные запасы.

Во-вторых, он может быть топливным или ресурсным хабом. Если локальное вещество позволяет получать воду, кислород, водород, инертное рабочее тело или

иные пригодные ресурсы, узел может обеспечивать не только транспортно-дозирующие аппараты данной структуры, но и другие миссии, работающие в той же области.

В-третьих, он может быть логистическим хабом. Транспортно-дозирующие аппараты, диагностические аппараты и аппараты обслуживания могут возвращаться к нему для пополнения, ремонта, калибровки или перенастройки.

В-четвёртых, он может быть навигационно-диагностическим хабом. Наличие оборудования наблюдения и картирования локальной области полезно не только для поддержания структуры, но и для будущих миссий в этой зоне.

В-пятых, он может быть технологическим хабом. По мере накопления опыта узел может переходить от простого фракционирования вещества к более сложным операциям: подготовке защитных элементов, изготовлению простых деталей, переработке побочных фракций или формированию новых типов дисперсных сред.

В-шестых, он может быть масштабируемым ядром. Если первый участок показывает работоспособность выбранной схемы, расширение проекта не начинается с нуля. Уже существует энергетика, связь, диагностика, добыча, переработка, транспортировка, дозированная подача и, в более развитом варианте, локальное топливное обеспечение. Это снижает барьер для создания второго участка, удлинения первого участка или перехода к более сложной структуре.

Таким образом, масса, доставленная с Земли в виде технологического ядра, должна оцениваться не как масса одного эксперимента, а как начальный капитал инфраструктурной зоны.

Почему масса оборудования может быть меньше массы рабочей структуры

Рабочая масса структуры может составлять десятки, сотни или даже тысячи тонн с учётом резерва и обслуживания. Однако это не означает, что технологическое ядро должно иметь такую же массу. Масса оборудования и масса вещества выполняют разные функции.

Оборудование — это функциональная масса. Оно добывает, перерабатывает, сортирует, транспортирует, измеряет и управляет. Рабочая фракция — это расходная или полурасходная масса, которая формирует дисперсную среду. Один и тот же аппарат может участвовать во многих циклах, тогда как одна и та же порция вещества после высвобождения становится частью структуры или её обслуживания.

Поэтому оценивать проект только через сумму M_{total} недостаточно. Нужно учитывать производительность оборудования:

$$Q_{effective} = M_{ready} / T$$

Если технологическое ядро имеет массу M_{earth} , но за время T способно подготовить массу M_{ready} , то важным параметром становится коэффициент массового усиления:

$$K_{local} = M_{ready} / M_{earth}$$

где:

$Q_{effective}$ (effective production rate) — эффективная производительность получения готовой рабочей фракции;

M_{ready} (ready-to-release mass) — масса подготовленного вещества;

T (production time) — время производства.

- K_{local} (local mass amplification coefficient) — коэффициент локального массового усиления, показывающий, какую массу подготовленного местного вещества способна обеспечить единица массы технологического ядра, доставленного с Земли;
- M_{earth} (Earth-delivered mass) — масса оборудования и технологических средств, доставляемых с Земли.

Если:

$$K_{local} > 1$$

то доставленная масса оборудования вовлекает в работу больше местного вещества, чем весит сама.

Если:

$$K_{local} \gg 1$$

то проект приобретает выраженный инфраструктурный смысл: земная доставка создаёт не саму структуру, а способность многократно формировать, обслуживать и расширять её из локального материала.

При этом для оценки сформированной структуры полезно ввести более строгую формулу коэффициента, учитывающую не только готовую фракцию, но и массу, реально вошедшую в рабочий профиль:

$$K_{profile} = M_{profile} / M_{earth}$$

где:

- $K_{profile}$ (profile mass amplification coefficient) — коэффициент профильного массового усиления, показывающий, какую массу вещества технологическое ядро способно реально включить в рабочий профиль структуры;
- $M_{profile}$ (profile mass) — масса вещества, фактически вошедшая в рабочий профиль структуры.

Эти соотношения позволяют оценивать не только массу создаваемой структуры, но и эффективность использования доставленного технологического ядра. Если $K_{local} > 1$, то единица массы оборудования обеспечивает подготовку большей массы местного вещества, чем весит сама. Если $K_{local} \gg 1$, доставка с Земли начинает выполнять инфраструктурную функцию: она обеспечивает не саму рабочую массу, а возможность её многократного локального получения. Более строгим критерием является $K_{profile}$, поскольку он учитывает не массу подготовленного вещества, а массу, которая после всех стадий подачи и рабочего включения реально становится частью функционирующей структуры.

Что не должно доставляться с Земли в базовом сценарии

В базовой логике первого рабочего участка нецелесообразно доставлять с Земли:

- всю массу рабочей дисперсной фракции;
- весь резерв для обслуживания;
- всю балластную массу;
- всю защитную массу;
- всё вещество для корректирующих подач;
- всё топливо или рабочее тело для всех последующих циклов;
- крупные объёмы простого расходного материала.

Именно эти категории должны по возможности формироваться локально. Если они доставляются с Земли, сценарий теряет значительную часть инфраструктурного преимущества и превращается в последовательность дорогих грузовых миссий.

Исключения возможны для ранних проверок. Например, калибровочная партия вещества, эталонная фракция, малый запас расходного материала, стартовый запас топлива или демонстрационный комплект могут быть доставлены с Земли для проверки оборудования. Но это не должно становиться базовой схемой формирования первого полноценного участка.

Что может доставляться с Земли даже при развитии локальной базы

Даже при успешном развитии производственно-логистического узла часть компонентов ещё долго будет доставляться с Земли. Это нормально и не противоречит настоящей постановке.

К таким компонентам относятся:

- точная электроника;
- вычислительные блоки;
- датчики высокого класса;
- оптические и радиотехнические системы;
- сложные исполнительные механизмы;
- специализированные материалы;
- микросхемы;
- программно-аппаратные комплексы управления;
- критические запасные части;
- элементы, производство которых на месте пока экономически нецелесообразно.

Инфраструктурная цель состоит не в полной независимости от Земли на первом этапе, а в резком снижении доли простой расходной массы, которую нужно поднимать с Земли. Иначе говоря, Земля поставяет сложность, а местная область поставяет массу, часть топлива и повторяемость рабочих циклов.

Эту логику можно выразить так:

Земля -> сложные системы

локальная область -> основная масса вещества + рабочее тело + топливо для циклов

Такое разделение делает проект более реалистичным, чем сценарий полной доставки структуры с Земли или, наоборот, нереалистичная идея полной автономности с первого этапа.

Связь настоящей главы с дальнейшими расчётами

Дальнейшая глава о массе вещества, плотности среды и геометрии первого участка должна читаться именно через это разделение. Когда в ней оценивается масса вещества в активной области, речь идёт не о массе, которую необходимо привезти с Земли. Речь идёт о массе, которую производственно-логистический узел должен подготовить, высвободить и реально включить в рабочую структуру.

Поэтому величины вида:

$$M_{\text{total}}$$

$$M_{\text{service}}$$

должны интерпретироваться как массы локального производственно-логистического цикла, а не как прямые пусковые массы с Земли.

При этом M_{struct} следует понимать как массу вещества, находящуюся в рабочем профиле структуры. Полная масса сырья и полная масса высвобождения могут быть больше:

$$M_{\text{release,total}} = M_{\text{struct}} / \eta_{\text{work}}$$

$$M_{\text{raw,total}} = M_{\text{struct}} / (\eta_{\text{frac}} * \eta_{\text{morph}} * \eta_{\text{work}})$$

Эти соотношения особенно важны для чтения следующей главы. Они показывают, что масса активной структуры, масса высвобождения, масса подготовленной фракции и масса исходного сырья относятся к разным уровням оценки. Их нельзя смешивать в одной величине и нельзя автоматически считать пусковой массой с Земли.

Соответственно, ключевыми вопросами становятся:

- какую массу оборудования нужно доставить с Земли;
- какую производительность это оборудование может обеспечить;
- какая доля местного вещества попадает в рабочую фракцию;
- какая доля высвобожденного вещества реально входит в рабочий профиль;
- может ли узел производить топливо или рабочее тело;
- каковы коэффициенты K_{local} и K_{profile} ;
- сколько циклов выполняет один возвращаемый аппарат;
- сколько циклов требуется для формирования участка;
- какой срок нужен для накопления, подачи и коррекции вещества;
- какая масса необходима для обслуживания;
- может ли узел после первого участка использоваться для других миссий.

Эта постановка позволяет избежать неверного вывода, что первый участок невозможен только потому, что его рабочая масса измеряется десятками или сотнями тонн. Сама по себе такая масса не является решающим запретом, если она формируется локально и поэтапно. Ограничивающими факторами становятся технологическая готовность, производительность, долговечность, автономность, диагностика, коэффициент рабочего включения, локальное топливное обеспечение и способность поддерживать структуру в рабочем состоянии.

Итог главы

Основной вывод настоящей главы состоит в том, что масса первого участка не должна пониматься как масса, подлежащая прямой доставке с Земли. В рассматриваемой постановке необходимо различать технологическое ядро, доставляемое с Земли, и рабочую массу, формируемую или вовлекаемую локально.

С Земли должны доставляться прежде всего сложные функциональные системы: энергетика, аппараты добычи и переработки, фракционирующие и накопительные системы, транспортно-дозировочные аппараты, диагностические платформы, связь,

управление и критические высокотехнологические компоненты. Локально должна формироваться основная рабочая масса: дисперсная фракция, резерв обслуживания, корректирующие подачи, вспомогательные массы и, при наличии подходящего сырья, топливо или рабочее тело.

Такое разделение меняет смысл последующих расчётов. Масса вещества в рабочем профиле структуры должна рассматриваться не как прямая пусковая масса с Земли, а как результат работы локального производственно-логистического цикла: получения сырья, подготовки фракции, накопления, дозированной подачи, измерения рабочего включения и обслуживания структуры.

Следовательно, практическая реализуемость первого участка определяется не только величиной рабочей массы, но и способностью доставленного технологического ядра многократно вовлекать местное вещество в управляемый цикл. Именно это отличает первый рабочий сценарий от разовой доставки расходного материала и подготавливает переход к расчёту массы, плотности и геометрии минимального участка.

23. Масса вещества, плотность среды и геометрия первого участка

После определения общего сценария и описания локального накопления, упаковки и подачи вещества необходимо перейти к оценке массы первого рабочего участка. На этом этапе практическая часть должна ответить на базовый вопрос: какой объём дисперсной среды требуется создать, какая масса вещества должна находиться в рабочем профиле участка и насколько эта масса отличается от массы вещества, которую необходимо подготовить, высвободить или переработать производственно-логистическому узлу.

Все последующие оценки массы следует относить не ко всему естественному диапазону межпланетной пыли и не ко всему сырью, добытому или переработанному производственно-логистическим узлом, а к подготовленной целевой рабочей фракции. Для первого расчётного сценария такой фракцией принимается диапазон 50–70 мкм. Более широкий диапазон 40–80 мкм или 40–90 мкм может рассматриваться как направление последующей оптимизации, но масса первого участка в настоящей версии должна пониматься как масса вещества, соответствующего выбранному рабочему диапазону и пригодного для включения в профиль структуры.

В настоящей главе рассматривается не окончательная геометрия будущей инфраструктурной линии, а первый ограниченный расчётный участок. В предыдущих главах практической части уже было принято, что расчёт относится к внутренней части главного пояса астероидов, условно к зоне порядка 2,3–2,5 а.е., а рабочая фракция первого сценария задаётся узким диапазоном 50–70 мкм. Теперь эти допущения связываются с геометрией, плотностью и массой вещества.

Первый участок не должен пониматься как готовая межпланетная трасса. Он не соединяет две планеты и не заменяет всю баллистическую схему движения. Его задача скромнее: создать ограниченную направленную дисперсную среду, в которой можно проверить достижимость заданной плотности, сохранение фракционного состава, возможность дозированной подачи, коэффициент рабочего включения, эрозионную цену, повторяемость прохождения и полезное кинетико-аэродинамическое воздействие на аппарат или защитно-стабилизирующий модуль.

При этом масса, рассчитываемая в данной главе, не должна пониматься как масса, которую необходимо целиком доставить с Земли. В соответствии с логикой предыдущей главы, масса активного участка — это масса вещества, находящаяся в рабочем профиле структуры. Для производственно-логистического узла отдельно должны оцениваться масса высвобождения, масса подготовленной фракции, масса исходного сырья, технологический резерв и масса оборудования, доставляемого с Земли.

Для первого расчётного варианта принимается длина участка:

$$L = 1\,000\,000 \text{ км}$$

Эта величина выбрана не как окончательный масштаб будущей инфраструктурной линии, а как минимальная протяжённость, при которой участок уже перестаёт быть локальным облаком вещества и может рассматриваться как самостоятельный инфраструктурный сегмент. При меньших длинах можно проводить лабораторно-орбитальные и демонстрационные эксперименты, но они ещё не будут показывать поведение протяжённой среды на межпланетном масштабе.

Для первого расчётного варианта также принимается радиус активного коридора:

$$r = 10 \text{ км}$$

Это означает, что активная область взаимодействия имеет диаметр порядка:

$$D = 20 \text{ км}$$

Такой коридор не следует понимать как жёсткую границу структуры. Он задаёт расчётную область, внутри которой параметры среды должны быть достаточно согласованы для прохождения аппарата заданного класса или разгонно-направляющего блока. За пределами этой области могут находиться более разреженные частицы, переходные зоны или следы предыдущих операций, но они не входят в базовую массу рабочего коридора.

В качестве широкого теоретического диапазона рабочей плотности используется ранее заданная область:

$$\rho_{\text{dust,theory}} = 10^{-13} - 10^{-12} \text{ кг/м}^3$$

где:

- $\rho_{\text{dust,theory}}$ (theoretical dust density) — широкий теоретический диапазон средней массовой плотности дисперсной среды в активной области структуры;

Для практических расчётов большого участка удобнее использовать километровые единицы. Поскольку:

$$1 \text{ км}^3 = 10^9 \text{ м}^3$$

Следовательно, широкий теоретический диапазон плотности

$$\rho_{\text{dust,theory}} = 10^{-13} - 10^{-12} \text{ кг/м}^3$$

можно записать так:

$$\rho_{\text{dust,theory}} = 10^{-4} - 10^{-3} \text{ кг/км}^3$$

Этот диапазон задаёт широкую теоретическую рамку. Он показывает, в каком интервале плотностей структура может оставаться крайне разреженной по обычным техническим меркам, но уже рассматриваться как направленная инфраструктурная среда, поскольку её частицы имеют заданный размерный состав, фазовую согласованность и векторное направление движения.

Масса контрольного участка длиной 1000 км

Сначала удобно оценить массу вещества на контрольном участке длиной:

$$L_{1000} = 1000 \text{ км}$$

При рабочем радиусе:

$$r = 10 \text{ км}$$

объём такого участка составляет:

$$V_{1000} = \pi * r^2 * L_{1000} \sim 314\,000 \text{ км}^3$$

При широком теоретическом диапазоне плотности:

$$\rho_{\text{dust,theory}} = 10^{-4} - 10^{-3} \text{ кг/км}^3$$

масса вещества в рабочем профиле контрольного участка определяется как:

$$M_{1000,\text{theory}} = \rho_{\text{dust,theory}} * V_{1000}$$

где:

- $M_{1000,\text{theory}}$ (theoretical mass of the 1000 km control section) — масса вещества, находящаяся в рабочем профиле контрольного участка длиной 1000 км;
- $\rho_{\text{dust,theory}}$ (theoretical dust density) — широкий теоретический диапазон средней массовой плотности дисперсной среды в активной области структуры;
- V_{1000} (volume of the 1000 km control section) — объём контрольного участка длиной 1000 км при принятом активном радиусе;

Отсюда:

$$M_{1000,\text{theory}} \sim 31 - 314 \text{ кг}$$

Этот результат важен для понимания масштаба. Короткий контрольный участок не требует большой массы вещества. Его сложность состоит не в массе как таковой, а в управляемом распределении, размерном составе, направленности, фазовой согласованности, мониторинге, коэффициенте рабочего включения и допустимости взаимодействия с аппаратом.

В практической части далее используется не весь широкий теоретический диапазон плотности, а его нижняя рабочая область. Поскольку первый участок является почти прямолинейным и не предназначен для выполнения интенсивных манёвров или торможения внутри самой среды, в качестве практического режима принимается плотность, близкая к нижней границе ранее заданного диапазона:

$$\rho_{\text{dust,opt}} \sim 10^{-4} - 2 * 10^{-4} \text{ кг/км}^3$$

где:

- $\rho_{\text{dust,opt}}$ (optimal dust density) — принятый для первого практического сценария диапазон средней массовой плотности дисперсной среды в активной области структуры.

При такой плотности масса контрольного участка длиной 1000 км составляет:

$$M_{1000,\text{opt}} \sim 31 - 62 \text{ кг}$$

где $M_{1000,\text{opt}}$ (optimal mass of the 1000 km control section) — масса вещества в рабочем профиле контрольного участка длиной 1000 км при принятом для первого практического сценария рабочем диапазоне плотности.

Это не отменяет теоретический диапазон 31–314 кг, но уточняет его практическое использование. Верхняя часть диапазона может быть важна для других режимов

структуры: участков повышенного взаимодействия, зон коррекции, торможения, входа, выхода или специальных направляющих областей. Однако для первого почти прямого минимального участка избыточное насыщение не является преимуществом. Оно увеличивает эрозионную цену, усложняет формирование, повышает требования к защите аппарата и ускоряет деградацию среды.

Поэтому дальнейшие расчёты первого ограниченного сценария должны опираться не на максимальную массу вещества, а на минимально достаточный режим:

$$M_{1000,opt} \sim 31\text{--}62 \text{ кг}$$

Масса полного участка длиной 1 000 000 км

Теперь можно перейти к расчётному участку длиной:

$$L = 1\,000\,000 \text{ км}$$

Поскольку контрольный участок имеет длину:

$$L_{1000} = 1000 \text{ км}$$

полный участок содержит 1000 таких контрольных сегментов. Следовательно, масса полного участка определяется как:

$$M_{1M,theory} = M_{1000,theory} * 1000$$

где:

- $M_{1M,theory}$ (theoretical mass of the 1 million km section) — теоретическая масса вещества в рабочем профиле участка длиной 1 000 000 км;
- $M_{1000,theory}$ (theoretical mass of the 1000 km control section) — масса вещества в рабочем профиле контрольного участка длиной 1000 км;
- коэффициент 1000 соответствует числу контрольных сегментов, из которых условно состоит расчётный участок.

Для широкого теоретического диапазона:

$$M_{1000,theory} \sim 31\text{--}314 \text{ кг}$$

получаем:

$$M_{1M,theory} \sim 31\text{--}314 \text{ т}$$

Эта величина показывает возможный теоретический диапазон массы рабочей дисперсной фракции в активном коридоре. Она не включает резерв, потери при высвобождении, обслуживание, коррекцию, нерабочие фракции и массу вещества, не вошедшую в рабочий профиль.

Для первого практического сценария основной расчёт должен вестись по нижней рабочей области плотности. Если масса контрольного участка принимается как:

$$M_{1000,opt} \sim 31\text{--}62 \text{ кг}$$

то активная масса полного участка составляет:

$$M_{1M,opt} \sim 31\text{--}62 \text{ т}$$

Именно это значение становится базовым для дальнейшей практической части. Широкий диапазон 31–314 т сохраняется как теоретическая рамка возможного насыщения, но не используется как основной рабочий сценарий первого участка.

Главный вывод состоит в том, что первый участок оказывается сложным не столько по массе вещества, сколько по точности его распределения. Активная масса может составлять десятки тонн, однако её необходимо распределить на длине 1 000 000 км, в активном коридоре диаметром порядка 20 км, с сохранением фракционного

состава, плотности, продольной направленности, фазовой согласованности и контролируемого рабочего включения вещества.

Рабочая масса и полный технологический запас

Полученная величина:

$$M_{1M,opt} \sim 31-62 \text{ т}$$

относится только к массе вещества, находящегося непосредственно в рабочем профиле структуры. Она не включает массу вещества, которая потребуется для неполного рабочего включения, корректирующих проходов, начального обслуживания, технологического резерва и возможных потерь при высвобождении.

Поэтому для первого приближения удобно ввести укрупнённый сценарный коэффициент резерва:

$$K_{reserve} = 3-10$$

Этот коэффициент не является инженерной нормой. Он используется как предварительная расчётная рамка, позволяющая учесть запас вещества на формирование, коррекцию и раннее обслуживание участка без отдельного задания всех частных потерь.

Следует подчеркнуть, что диапазон $K_{reserve} = 3-10$ в настоящей работе не является результатом расчёта коэффициента рабочего включения и не означает, что 70–90 % вещества обязательно теряется при формировании структуры. Напротив, в рассматриваемой концепции предполагается, что при продольно-направленном высвобождении вещества вдоль траектории формирования значительная часть рабочей фракции потенциально может входить в расчётный профиль. Именно поэтому ранее рассматривалась схема распределённого формирования через большое число транспортно-дозировочных аппаратов, где ширина зоны подачи сопоставима с шириной формируемого коридора. В таком режиме потери на этапе включения могут оказаться существенно ниже, чем при попытке сформировать тот же профиль из небольшого числа аппаратов с широким углом распыления.

Поэтому коэффициент $K_{reserve}$ следует рассматривать не как оценку потерь вещества, а как консервативный технологический запас, учитывающий неопределённость параметров первого сценария: возможные корректирующие подачи, обслуживание, неравномерность распределения, внешние возмущения, диагностические операции и иные факторы, которые на данном этапе ещё не имеют надёжной количественной оценки. По мере уточнения коэффициента рабочего включения, долговечности структуры и требований к обслуживанию этот диапазон может быть существенно пересмотрен.

Тем не менее если мы первоначально задаем $K_{reserve} = 3-10$, то полный технологический запас подготовленной фракции можно оценить как:

$$M_{total,opt} = K_{reserve} * M_{1M,opt}$$

где:

- $M_{total,opt}$ (total prepared mass) — полный запас подготовленной рабочей фракции, учитывающий формирование участка, корректирующие операции и начальное обслуживание;
- $M_{1M,opt}$ (optimal active mass of the 1 million km section) — масса вещества, находящаяся непосредственно в рабочем профиле первого расчётного участка длиной 1 000 000 км;

- K_{reserve} (reserve coefficient) — укрупнённый коэффициент резерва, учитывающий необходимость дополнительного вещества для формирования, коррекции распределения, компенсации потерь и начального обслуживания структуры.

При нижней оценке:

$$M_{\text{total,opt}} \sim 3 * 31 \text{ т} \sim 93 \text{ т}$$

Округлённо:

$$M_{\text{total,opt}} \sim 100 \text{ т}$$

При верхней оценке практического режима:

$$M_{\text{total,opt}} \sim 10 * 62 \text{ т} \sim 620 \text{ т}$$

Округлённо:

$$M_{\text{total,opt}} \sim 600 \text{ т}$$

Следовательно, для первого практического сценария расчётный диапазон подготовленного вещества с резервом составляет:

$$M_{\text{total,opt}} \sim 100\text{--}600 \text{ т}$$

Этот диапазон следует понимать не как массу, одновременно находящуюся в дисперсной среде, а как массу подготовленного вещества и резерва, которую производственно-логистический узел должен вовлечь в цикл формирования, коррекции и начального обслуживания. Если коэффициент рабочего включения задаётся отдельно, значение K_{reserve} должно быть скорректировано, чтобы не учитывать один и тот же фактор дважды.

Широкий диапазон:

$$M_{\text{total,theory}} \sim 100\text{--}3000 \text{ т}$$

может сохраняться как верхняя теоретическая рамка для более плотных участков, менее эффективных технологических схем, зон повышенного взаимодействия или расширенных запасов обслуживания. Однако для первого почти прямого участка основным рабочим диапазоном является:

$$M_{\text{total,opt}} \sim 100\text{--}600 \text{ т}$$

Связь рабочей массы, технологического запаса и сырьевой массы

Полный технологический запас $M_{\text{total,opt}}$ относится к подготовленной рабочей фракции, пригодной для подачи в структуру. Он не равен массе исходного сырья, которое должно пройти через производственно-логистический узел в локальном масштабируемом сценарии. Между локальным материалом и готовой фракцией существует технологический фильтр: часть вещества не попадает в диапазон 50–70 мкм, часть может иметь нежелательную морфологию, часть теряется при переработке, упаковке, транспортировке и корректирующих операциях.

Поэтому массу сырья необходимо оценивать отдельно от массы готового вещества. В общем виде связь можно записать так:

$$M_{\text{ready}} = \eta_{\text{frac}} * \eta_{\text{morph}} * M_{\text{raw}}$$

Следовательно:

$$M_{\text{raw}} = M_{\text{ready}} / (\eta_{\text{frac}} * \eta_{\text{morph}})$$

где:

- M_{ready} (ready fraction mass) — масса подготовленной рабочей фракции;

- M_{raw} (raw material mass) — масса исходного сырья;
- η_{frac} (fraction yield coefficient) — коэффициент выхода нужного размерного диапазона;
- η_{morph} (morphological suitability coefficient) — коэффициент морфологической пригодности частиц.

Эта запись важна не как точный расчёт добычного комплекса, а как указание на связь между массой структуры и технологическими параметрами подготовки вещества. Даже если активная масса участка составляет только 31–62 т, локальный производственно-логистический узел должен обработать больше сырья, чем окажется в рабочей зоне. Чем ниже выход нужной фракции, чем строже требования к морфологии частиц и чем ниже коэффициент рабочего включения, тем больше исходного материала должно пройти через цикл дробления, сортировки, отбора, накопления и подачи.

Для первого приближения можно принять, что произведение коэффициентов:

$$\eta_{\text{frac}} * \eta_{\text{morph}}$$

находится в широком диапазоне:

$$0,1-0,5$$

Тогда при массе подготовленной фракции с резервом:

$$M_{\text{total,opt}} \sim 100-600 \text{ т}$$

масса исходного сырья в локальном масштабируемом сценарии может быть оценена как порядок:

$$M_{\text{raw}} \sim 200-6000 \text{ т}$$

Эта оценка не означает, что весь объём сырья должен быть одновременно извлечён, переработан и сохранён. Она показывает общий порядок массы, проходящей через производственно-логистический цикл при формировании и начальном обслуживании первого участка.

Для локальной инфраструктурной системы принципиально важно сохранять различие между уровнями массы, описанными в предыдущей главе. Поэтому масса активной структуры, масса высвобождения, масса технологического запаса и масса исходного сырья не должны смешиваться в одной оценке. Активная структура показывает, сколько вещества требуется для создания рабочего профиля; масса высвобождения показывает, сколько вещества должно быть подано в область формирования; технологический запас показывает, какой резерв нужен для эксплуатации; сырьевой поток показывает, какой объём материала должен пройти через производственно-логистический узел, чтобы получить и поддерживать требуемую рабочую фракцию.

В демонстрационно-инфраструктурном варианте с земной подготовкой вещества эта часть сложности переносится на наземную промышленную базу. В космос доставляется уже готовая или почти готовая рабочая фракция, а не сырьё, которое ещё нужно дробить, сортировать и морфологически подготавливать на месте. Это не устраняет необходимость в контейнерах, дозаторах, распылителях, навигации и диагностике, но резко снижает требования к первому космическому производственно-логистическому узлу.

Объём подготовленного вещества до высвобождения

Масса рабочей фракции в дисперсной структуре распределяется по огромному объёму, но до высвобождения она должна храниться в более компактной форме: в

накопителях, контейнерах, кассетах, баках, распределительных системах или иных элементах производственно-логистического узла.

Если принять насыпную или эффективную плотность подготовленного вещества:

$$\rho_{\text{bulk}} = 500\text{--}2000 \text{ кг/м}^3$$

то объём запасённого материала:

$$V_{\text{stock}} = M_{\text{total,opt}} / \rho_{\text{bulk}}$$

где:

- V_{stock} (stored material volume) — объём подготовленного вещества до высвобождения;
- $M_{\text{total,opt}}$ (total prepared mass) — полный запас подготовленной рабочей фракции;
- ρ_{bulk} (bulk density) — насыпная или эффективная плотность подготовленного вещества.

Для диапазона:

$$M_{\text{total,opt}} \sim 100\text{--}600 \text{ т}$$

получаем:

$$V_{\text{stock,opt}} \sim 50\text{--}1200 \text{ м}^3$$

где $V_{\text{stock,opt}}$ (optimal stored material volume) — ориентировочный объём подготовленной рабочей фракции, находящейся в накопителях, контейнерах или иных системах временного хранения до высвобождения в структуру.

Этот объём не мал, но он уже относится не к космическому пространству, а к запасам вещества в накопителях, контейнерах, кассетах или иных системах временного хранения. Такая величина делает задачу не тривиальной, но переводит её из области невозможного в область инженерно-логистического анализа.

Если сравнивать этот объём с промышленными ёмкостями, контейнерными системами или модульными накопителями, он не выглядит запредельным. Сложность состоит не в том, чтобы где-то разместить 50–1200 м³ вещества, а в том, чтобы подготовить это вещество в нужном фракционном диапазоне, сохранить его морфологическую пригодность, доставить к точке высвобождения и распределить по расчётному коридору с необходимой точностью.

В этом смысле объём запасённой фракции также поддерживает развилку двух сценариев. В локальном масштабируемом сценарии такие объёмы должны быть созданы и накоплены в районе производственно-логистического узла. В первом демонстрационно-инфраструктурном сценарии часть или весь объём может быть подготовлен на Земле и доставлен как расходный материал для формирования первого участка.

Сравнение с массой Международной космической станции

Для оценки масштаба полезно сравнить полученные величины с уже реализованным крупным космическим объектом. Масса Международной космической станции составляет около 420 т. Сравнение с первым участком показывает важное изменение практической постановки. Активная масса первого участка в оптимальном режиме составляет:

$$M_{1M,opt} \sim 31\text{--}62 \text{ т}$$

То есть она примерно в 7–14 раз меньше массы МКС. Даже полный технологический запас подготовленной фракции:

$$M_{\text{total,opt}} \sim 100\text{--}600 \text{ т}$$

находится в диапазоне, который уже сопоставим с крупной космической инфраструктурной программой, но не уходит в планетарный масштаб вещества.

Это сравнение не означает технического сходства объектов. Международная космическая станция представляет собой высокотехнологический комплекс: герметичные модули, энергетические системы, радиаторы, фермы, стыковочные узлы, системы жизнеобеспечения, связь, управление ориентацией, научное оборудование и множество других элементов. Рабочая масса первого дисперсного участка имеет иную природу. Это не высокотехнологическое оборудование в массе станции, а преимущественно подготовленная дисперсная фракция, которую необходимо точно распределить в пространстве.

Именно это различие усиливает реализуемость первого сценария. Если активная масса структуры существенно меньше массы МКС, а сама масса является в основном расходным веществом, то первый проект не обязательно должен начинаться с развёртывания сложного космического производственного комплекса. Он может быть начат как демонстрационно-инфраструктурный проект, в котором подготовленная фракция доставляется с Земли, а в космосе выполняются операции хранения, дозированного высвобождения, диагностики, оценки рабочего включения и коррекции.

Такой подход не отменяет необходимости локального производства в будущем. Для масштабируемой сети доставка всей рабочей массы с Земли будет ограничением. Но для первого участка это сравнение показывает, что наиболее сложная часть — не абсолютная масса вещества, а точность его организации. Поэтому практическая часть работы должна рассматривать два сценария формирования: масштабируемый локальный сценарий и более простой первый демонстрационный сценарий с земной подготовкой рабочей фракции.

Два сценария формирования первого участка

Из полученных расчётов следуют два возможных сценария формирования первого участка.

Первый сценарий — основной масштабируемый. В нём вещество добывается и подготавливается локально, в районе малых тел или производственно-логистического узла. Такая схема включает добычу сырья, дробление, фракционирование, морфологическую подготовку, накопление, упаковку, доставку к зоне высвобождения, распыление, диагностику и обслуживание. Этот сценарий сложнее на начальном этапе, но именно он необходим для дальнейшего расширения сети, потому что позволяет не доставлять всю расходную массу с Земли.

Второй сценарий — демонстрационно-инфраструктурный. В нём рабочая фракция подготавливается на Земле и доставляется к выбранной области в виде готового или почти готового вещества. В космосе остаются операции хранения, дозирования, продольно-направленного высвобождения, диагностики, оценки рабочего включения и коррекции. Такой сценарий хуже масштабируется, но может быть значительно проще как первый проект, поскольку не требует немедленного развёртывания космического комплекса добычи и фракционирования.

Сравнение этих сценариев можно представить так:

Параметр	Масштабируемый локальный сценарий	Демонстрационно-инфраструктурный сценарий
Источник вещества	Локальное сырьё малых тел	Подготовленная фракция с Земли
Главная сложность	Добыча, дробление, фракционирование, морфологическая подготовка	Доставка массы, хранение, дозирование, распыление
Масштабируемость	Высокая	Ограниченная
Пригодность для первого проекта	Сложнее	Проще
Роль производственно-логистического узла	Полная	Сокращённая
Основной выигрыш	Независимость от земной доставки при расширении сети	Быстрая проверка физической реализуемости участка
Ключевой проверяемый параметр	Полная производственно-логистическая цепочка	Формирование, измерение и коррекция рабочего профиля

Таким образом, уменьшение практической массы первого участка меняет не только численную оценку, но и стратегию проверки первого сценария. Если активная масса составляет 31–62 т, то первый участок можно рассматривать как проект, в котором главная задача состоит не в создании космической добывающей промышленности с первого шага, а в проверке возможности сформировать протяжённую, направленную и диагностируемую дисперсную среду из уже подготовленного вещества.

Масса как не главный ограничитель первого участка

Полученные величины показывают, что первый практический участок не требует планетарных объёмов вещества. В активной области структуры находится порядка:

$$M_{1M,opt} \sim 31\text{--}62 \text{ т}$$

а полный технологический запас подготовленной фракции для формирования, коррекции и раннего обслуживания можно оценить как:

$$M_{total,opt} \sim 100\text{--}600 \text{ т}$$

Даже с учётом сырьевого потока через производственно-логистический узел порядок требований остаётся инженерно-инфраструктурным:

$$M_{raw} \sim 200\text{--}6000 \text{ т}$$

Эти величины существенны, но они не являются главным препятствием сценария. В масштабируемом сценарии проблема массы может быть решена локальной добычей, переработкой и накоплением вещества. В демонстрационно-инфраструктурном сценарии часть этой проблемы может быть решена доставкой заранее подготовленной рабочей фракции с Земли.

Гораздо более сложной задачей является не сама масса, а её организация. Необходимо не просто получить десятки тонн активной фракции, а распределить её вдоль участка длиной 1 000 000 км и диаметром порядка 20 км, сохранив:

- заданный размерный диапазон частиц;
- морфологическую пригодность фракции;
- рабочую плотность;
- продольную направленность;
- фазовую согласованность;
- допустимый поперечный профиль;
- возможность диагностики;
- возможность оценки рабочего включения;
- возможность корректирующих операций.

Именно это отличает первый участок от простого облака пыли. Он должен быть не только разреженным распределением вещества, но и движущейся орбитально-согласованной средой, которая сохраняет параметры достаточно долго, чтобы аппарат или защитно-стабилизирующий модуль мог получить воспроизводимое направляющее воздействие, а полученная коррекция затем продолжала работать на последующем баллистическом участке.

Приближённость геометрической модели

Используемая в настоящей главе оценка через объём:

$$V = \pi * r^2 * L$$

является первым приближением. Она не означает, что реальная структура должна быть идеальным цилиндром с резкой границей и постоянной плотностью по всему сечению. В действительности рабочая область может иметь продольный градиент, поперечный профиль плотности, входные и выходные зоны, области перекрытия сегментов, локальные коррекционные участки и периферийные зоны пониженной плотности.

Тем не менее цилиндрическая оценка полезна как расчётная база. Она позволяет определить порядок массы, необходимой для первого участка, и связать между собой длину, радиус, плотность и технологический запас. На следующем этапе эти параметры могут уточняться через профиль плотности:

$$\rho_{\text{dust}} = \rho_{\text{dust}}(s, r_{\text{perp}}, t)$$

где:

- s — координата вдоль структуры;
- r_{perp} (transverse coordinate) — поперечная координата;
- t — время.

В этом случае масса участка будет определяться уже не простой формулой $\pi * r^2 * L$, а интегралом по рабочему объёму. Однако для первого ограниченного сценария достаточно оценки по среднему активному радиусу и средней рабочей плотности.

Она показывает главное: первый участок не требует огромной массы вещества, но требует крайне точной пространственной и фазовой организации.

Итог главы

Расчёт показал, что первый участок может быть задан конкретной геометрией: длиной 1 000 000 км и активным диаметром порядка 20 км. При широком теоретическом диапазоне плотности такая область требует примерно 31–314 т вещества в рабочем профиле.

Однако для первого практического сценария выбран не верхний, а нижний рабочий режим плотности. Поэтому базовая активная масса участка оценивается не сотнями тонн, а десятками тонн — порядка 31–62 т. Эта масса относится к веществу, уже находящемуся в рабочем профиле структуры и соответствующему принятой рабочей фракции 50–70 мкм.

Следовательно, первый участок оказывается реалистичнее по массе, чем может показаться из самой идеи протяжённой структуры. Главный ограничитель переносится с количества вещества на качество его организации: необходимо не просто получить массу, а распределить её на огромной длине, сохранить заданную плотность, направленность, фракционный состав, диагностируемость и возможность корректировки.

Проведённые оценки также показывают, что для первичной проверки концепции принципиально важным становится не развёртывание сразу всей инфраструктуры, а демонстрация возможности сформировать протяжённую направленную дисперсную среду с контролируемыми характеристиками. Если такая среда может быть создана, измерена и поддержана в рабочем состоянии, дальнейшее развитие системы становится вопросом масштабирования и совершенствования производственно-логистического контура, а не пересмотра самой базовой идеи.

24. Формирование минимального участка структуры

В предыдущих главах были определены основные параметры первого практического сценария. В качестве области работ принята внутренняя часть главного пояса астероидов порядка 2,3–2,5 а.е. Рабочей фракцией выбран диапазон частиц 50–70 мкм. Для первого расчётного сценария принят участок длиной 1 000 000 км с активным диаметром порядка 20 км.

Проведённые оценки показали, что при выбранном диапазоне плотности активная масса вещества в рабочем профиле составляет порядка 31–62 т. При этом масса подготовленной фракции, необходимой для формирования, коррекции и начального обслуживания участка, может быть существенно больше и зависит от параметров производственно-логистического цикла.

Однако сами по себе геометрия, плотность и масса ещё не определяют существование структуры. Наличие необходимого количества вещества не гарантирует появления рабочего участка. Поэтому далее необходимо определить, какие условия должны одновременно выполняться, чтобы расчётный объём можно было рассматривать как минимальный участок структуры.

Что должно существовать одновременно?

Минимальный участок представляет собой не просто распределение частиц в пространстве, а организованную дисперсную среду с заданными параметрами.

Для его существования необходимо одновременное выполнение нескольких условий.

Во-первых, должна существовать рабочая фракция с контролируемым размерным составом. В настоящем сценарии такой фракцией является диапазон 50–70 мкм.

Во-вторых, должна поддерживаться рабочая плотность среды. Недостаточная плотность делает взаимодействие практически неотличимым от естественного фона, тогда как чрезмерная плотность увеличивает эрозионную нагрузку и усложняет поддержание структуры.

В-третьих, частицы должны сохранять орбитальную согласованность. Структура должна представлять собой не случайное облако вещества, а протяжённую область с заданной направленностью и ограниченным фазовым разбросом.

В-четвёртых, структура должна быть измеримой. Должна существовать возможность определить её параметры, оценить распределение вещества и контролировать изменение профиля во времени.

В-пятых, структура должна допускать коррекцию и обслуживание. Если после формирования невозможно компенсировать возмущения, пополнять вещество и восстанавливать профиль, то такая система превращается в одноразовый выброс, а не в инфраструктурный объект.

Только одновременное выполнение этих условий позволяет рассматривать участок как рабочую структуру.

В более строгом смысле минимальный участок считается не просто сформированным, а подтверждённым только при выполнении нескольких проверяемых условий: рабочая фракция находится в заданном диапазоне, плотность не падает ниже минимального рабочего уровня, профиль имеет достаточную протяжённость, вещество входит в активный коридор, параметры участка измерены, а отклонения могут быть скорректированы. Поэтому критерий формирования должен относиться не к массе высвобождения, а к состоянию рабочего профиля.

Формирование рабочего профиля

Первый участок не предполагает последовательного построения тысячи изолированных сегментов длиной по 1000 км. Такая схема была бы оправдана при крайне большой массе распыления, малом числе аппаратов или необходимости длительно проверять каждый участок перед переходом к следующему. Для принятого диапазона масс более рациональной является распределённая схема формирования, при которой рабочий профиль создаётся сразу на значительной части расчётной длины.

В этом варианте группа транспортно-дозировочных аппаратов входит в расчётную область условно одновременно и выполняет продольно-направленное высвобождение вещества вдоль будущего профиля. Формирование структуры тогда является не последовательной сборкой отдельных блоков, а распределённой операцией создания протяжённого рабочего коридора.

Такой подход важен для коэффициента рабочего включения. Если вещество высвобождается преимущественно вдоль траектории аппарата-распылителя, а зона подачи согласована с шириной формируемого коридора, значительная часть подготовленной фракции потенциально может входить в рабочий профиль. Это принципиально отличается от попытки сформировать широкий коридор малым

числом аппаратов за счёт сильного поперечного распыления, при котором доля вещества, ушедшего за пределы рабочего профиля, резко возрастает.

Многоаппаратный режим формирования

Для рабочего коридора диаметром порядка 20 км целесообразно рассматривать многоаппаратный режим формирования. В такой схеме каждый транспортно-дозировочный аппарат отвечает не за весь объём участка, а за ограниченную часть поперечного и продольного профиля. Это позволяет не требовать от одного аппарата широкого распыления на весь коридор и повышает вероятность попадания вещества в рабочую область.

В рассматриваемом сценарии число аппаратов может составлять несколько сотен. Условная схема с несколькими сотнями транспортно-дозировочных аппаратов позволяет распределить массу между носителями и сформировать профиль не единичным выбросом, а согласованным фронтом подачи. При активной массе рабочего профиля порядка 31–62 т нагрузка на отдельный аппарат может оставаться умеренной; даже при технологическом запасе порядка 100–600 т масса на один аппарат остаётся предметом инженерной логики, а не принципиальным запретом.

Поэтому многоаппаратный режим является не второстепенной деталью, а одним из способов повысить рабочее включение вещества. Его смысл состоит в том, чтобы заменить грубое расширение зоны распыления пространственным распределением самих аппаратов.

Условно одновременное формирование

Для первого участка не требуется абсолютная синхронность высвобождения вещества всеми аппаратами. Существенно другое: операции подачи должны выполняться в пределах одного расчётного окна времени, достаточно короткого по сравнению с характерным временем естественной деградации и фазового расхождения структуры.

В таком режиме отдельные части профиля появляются как элементы одного рабочего участка, а не как независимые облака, сформированные в разные периоды. Поэтому условно одновременное формирование следует понимать как согласованную операцию группы аппаратов, при которой время формирования меньше времени, за которое структура успевает существенно потерять рабочую плотность, направленность или орбитальную согласованность.

Условие непрерывности и управляемой неоднородности

Первый участок не требует идеально равномерного распределения вещества по всей длине и ширине. Реальный профиль может включать области повышенной и пониженной плотности, переходные зоны, участки коррекции и технологические неоднородности. Однако такая неоднородность допустима только в том случае, если она остаётся измеряемой, ограниченной и управляемой.

Критическим является отсутствие провалов, при которых среда перестаёт выполнять свою функцию. Если между зонами подачи возникают разрывы, где плотность падает ниже минимального рабочего уровня, аппарат проходит уже не через протяжённую направленную среду, а через набор отдельных облаков. Для демонстрационного опыта это может быть допустимо, но для минимального рабочего участка — нет.

Поэтому требование к первому участку следует формулировать не как требование абсолютной однородности, а как требование функциональной непрерывности.

Плотность, размерный состав и орбитальная согласованность могут изменяться вдоль профиля, но эти изменения должны оставаться в пределах, при которых сохраняется воспроизводимое прохождение аппарата и возможность последующей коррекции.

При этом формирование первого участка считается завершённым тогда, когда рабочий профиль создан на расчётной длине, подтверждены его основные параметры и дальнейшее поддержание требует только корректирующих, а не формирующих операций.

Условие входа аппарата

Минимальный участок должен быть достаточно широким, чтобы аппарат мог войти в рабочую область с реальной навигационной точностью. Именно поэтому в первом сценарии принят радиус $r = 10$ км.

Эта величина является не только геометрическим параметром для расчёта массы, но и параметром допустимого окна входа. Она задаёт область, внутри которой сохраняется рабочий режим взаимодействия аппарата с дисперсной средой.

При этом радиус 10 км не следует рассматривать как окончательно выбранный оптимум. Это консервативное первое приближение, позволяющее получить начальную оценку массы, плотности и требований к навигации. В дальнейшем ширина рабочего коридора может уточняться по результатам моделирования и экспериментальной проверки.

Ширина рабочего коридора не является универсальной величиной для всех аппаратов. Она должна определяться исходя из характеристик того класса аппаратов, для которого проектируется участок: массы аппарата, эффективной площади взаимодействия, допустимой эрозионной нагрузки, навигационной точности входа и наличия защитно-стабилизирующего модуля.

В настоящем расчётном сценарии под таким аппаратом понимается не произвольный космический аппарат, а аппарат или разгонно-направляющий блок, оснащённый вынесенной рабочей поверхностью, экраном, внешним баком, плитой или иным элементом, специально рассчитанным на взаимодействие с дисперсной средой.

Следует учитывать, что радиус является одним из наиболее чувствительных параметров массы структуры. Поскольку масса рабочего профиля пропорциональна квадрату радиуса, даже относительно небольшое уменьшение ширины коридора приводит к заметному снижению требуемой массы вещества. Например, уменьшение радиуса с 10 до 9 км снижает массу примерно на 19 %, а уменьшение до 8 км — примерно на 36 %.

Поэтому выбранное значение следует рассматривать не как окончательное проектное решение, а как исходную расчётную точку. По мере уточнения требований к навигации, точности входа, допустимой эрозионной нагрузке и характеристикам защитно-стабилизирующего модуля радиус рабочего коридора может быть как уменьшен, так и увеличен.

Таким образом, ширина коридора является не только параметром геометрии структуры, но и одним из инструментов её оптимизации. Она напрямую связывает между собой требования к навигации, допустимую массу вещества и характеристики аппаратов, для которых создаётся первый участок. При этом поиск оптимального радиуса не входит в задачи настоящей работы и требует отдельного анализа взаимодействия аппарата со средой, навигационной точности, допустимой

эрозионной нагрузки и критериев рабочего включения. Это уже детали оптимизации следующего уровня.

Условие прохождения и выхода

Вход аппарата в рабочий коридор сам по себе ещё не является достаточным критерием работоспособности участка. Структура должна обеспечивать возможность прохождения аппарата через расчётную область с сохранением контролируемого взаимодействия на значительной части её длины и с последующим выходом без разрушения рабочего профиля. Поэтому минимальный участок должен рассматриваться не только как область входа, но и как область устойчивого прохождения, в которой воздействие среды остаётся воспроизводимым и допускает последующую оценку результатов. Именно возможность входа, прохождения и выхода образует полный цикл практической проверки первого участка.

Что не является минимальным участком

Важно различать минимальный участок структуры и другие формы распределения вещества в космическом пространстве.

Сам по себе единичный выброс вещества ещё не образует структуру. Если после высвобождения вещество не измеряется, не корректируется и не обслуживается, такой объект остаётся лишь результатом отдельной операции.

Не является структурой и естественное дисперсное образование. Кометные хвосты, метеорные потоки и иные природные распределения частиц демонстрируют возможность существования протяжённых дисперсных сред, однако они не создаются для выполнения инфраструктурной функции и не обладают контролируемым рабочим профилем.

Не является структурой и демонстрационное облако вещества, сформированное только для кратковременного эксперимента без последующего поддержания параметров.

Минимальный участок возникает лишь тогда, когда распределение вещества становится измеряемым, обслуживаемым и способным сохранять рабочие характеристики в течение заданного времени.

Практический масштаб и ограничения первого сценария

Полученные оценки задают порядок величин первого участка. Активная масса рабочего профиля составляет порядка 31–62 т, а полный технологический запас, необходимый для формирования, коррекции и начального обслуживания, может достигать порядка 100–600 т. Эти значения относятся к подготовленной рабочей фракции и определяют масштаб первого практического сценария.

Полученные в предыдущих главах оценки допускают два различных подхода к формированию участка. Первый подход предполагает локальное получение и подготовку вещества в области работ и соответствует долгосрочной инфраструктурной логике развития системы. Второй подход предполагает предварительную подготовку рабочей фракции на Земле с последующей доставкой к месту формирования. Такой вариант хуже масштабируется, но может быть удобнее для первичной проверки концепции.

Однако сами по себе оценки массы ещё не определяют реализуемость первого участка. Главный инженерный вопрос состоит не в том, сколько вещества требуется, а в том, может ли это вещество быть организовано в рабочий профиль на длине порядка 1 000 000 км.

Основным ограничением первого сценария становится точность формирования и подтверждение рабочего состояния профиля. Необходимо не только высвободить вещество, но и показать, что оно вошло в активный коридор, сохранило требуемую фракцию, плотность, направленность и орбитальную согласованность.

Особое значение имеет коэффициент рабочего включения. Если подача вещества выполняется распределённой группой аппаратов, а зона высвобождения согласована с шириной рабочего коридора, значительная часть подготовленной фракции потенциально может войти в рабочий профиль. Поэтому рабочее включение должно рассматриваться не как заранее заданное ограничение, а как один из ключевых проверяемых параметров первого сценария.

Следовательно, успешность формирования определяется не только массой вещества, а совокупностью условий: согласованностью подачи, непрерывностью профиля, измеримостью, корректируемостью и способностью сохранять рабочие параметры до прохождения аппарата. Именно эти факторы должны рассматриваться как основные критерии реализуемости минимального участка структуры.

Итог главы

Минимальный участок не должен определяться только через длину, массу или факт высвобождения вещества. Он становится рабочей структурой лишь тогда, когда подготовленная фракция формирует протяжённый, измеряемый и корректируемый профиль с заданной плотностью, орбитальной согласованностью и допустимым поперечным коридором.

Для первого практического сценария принят участок длиной 1 000 000 км, рабочим диаметром порядка 20 км и активной массой профиля около 31–62 т. Эти параметры задают масштаб первого формирования, но не исчерпывают задачу. Главным становится не само накопление вещества, а его организованное включение в рабочий профиль.

Поэтому формирование первого участка следует рассматривать как распределённую многоаппаратную операцию. Группа транспортно-дозировочных аппаратов должна создать рабочий профиль не единичным выбросом и не последовательной сборкой изолированных сегментов, а согласованным высвобождением вещества вдоль расчётной области. Такой режим позволяет уменьшить требования к поперечному распылению и повысить долю вещества, действительно вошедшего в рабочий профиль.

В главе показано, что минимальный участок можно считать сформированным только тогда, когда созданный профиль не просто существует расчётно, а подтверждён измерениями, сохраняет рабочие параметры, допускает коррекцию и обеспечивает полный цикл практической проверки: вход аппарата, прохождение через рабочую область и последующий выход с воспроизводимым результатом.

Следовательно, первый участок является не облаком пыли и не разовым выбросом вещества, а ограниченным инфраструктурным сегментом. Его успешность должна оцениваться не по массе высвобождения, а по состоянию рабочего профиля: вошло ли вещество в активный коридор, сохраняется ли структура как направленная среда и может ли она быть использована повторно или обслужена после прохождения аппарата.

25. Сравнение режимов движения: гомановский переход, высокоэнергетическая траектория и траектория со структурой

После определения минимального участка необходимо перейти к вопросу о его практической пользе. В предыдущих главах было показано, что первый участок может быть сформирован как разреженная, протяжённая, орбитально-согласованная и обслуживаемая дисперсная среда. Однако для оценки инфраструктурного смысла этого недостаточно. Необходимо показать, в какой траекторной ситуации такая среда вообще становится полезной, с чем её следует сравнивать и какой количественный результат может получиться в первом расчётном примере.

Цель настоящего сравнения состоит не в сопоставлении отдельных величин Δv как таковых. Сравниваются три различных архитектуры движения: низкоэнергетическая баллистическая траектория без структуры, более энергичная траектория без инфраструктурной поддержки и более энергичная траектория с использованием дисперсной структуры. Поэтому предметом сравнения являются не только импульсные затраты, но и длительность перелёта, коррекционная цена, требования к точности входа, устойчивость прохождения и возможность повторного использования инфраструктурного участка.

Главная методологическая ошибка при оценке такой структуры состояла бы в том, чтобы сравнивать её напрямую с двигателем. Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура не является двигательной установкой аппарата и не должна рассматриваться как замена химическому, электрореактивному, ядерному, солнечно-парусному или иному способу создания тяги. Она выполняет другую функцию: создаёт внешнюю подготовленную среду, через которую может проходить аппарат, разгонно-направляющий блок или защитно-стабилизирующий модуль.

Поэтому корректное сравнение должно строиться не по схеме: дисперсная структура против двигателя, а по другой схеме: высокоэнергетическая траектория без структуры против высокоэнергетической траектории со структурой.

Иными словами, структура должна оцениваться не как самостоятельный источник полного межпланетного Δv , а как инфраструктурная среда, способная изменить цену уже выбранного высокоэнергетического режима: уменьшить часть бортового импульса, снизить коррекционную цену, расширить допустимое окно входа, повысить повторяемость прохождения и частично перенести стабилизирующую или тормозную функцию с аппарата на заранее сформированную среду.

При этом способ формирования первого участка не меняет критерий его траекторной полезности. Участок может быть создан как в масштабируемом локальном сценарии, с получением вещества в районе производственно-логистического узла, так и в демонстрационно-инфраструктурном сценарии, с доставкой заранее подготовленной фракции с Земли. В обоих случаях траекторный эффект оценивается одинаково: не по происхождению вещества, а по тому, снижает ли сформированная среда цену перехода к более энергичному режиму движения, уменьшает ли объём коррекций, облегчает ли вход в целевой режим и повышает ли повторяемость прохождения.

Миссионная база сравнения: Веста и внутренняя область главного пояса

В качестве практической базы удобно использовать направление, близкое к реальной миссии Dawn к Весте. Веста расположена во внутренней части главного

пояса астероидов и имеет большую полуось орбиты около 2,36 а.е., что хорошо соответствует принятой в работе расчётной области 2,3–2,5 а.е.¹⁹.

Миссия Dawn является полезным ориентиром не потому, что она полностью совпадает с предлагаемым сценарием, а потому что она показывает реальный порядок длительности перелёта к объекту главного пояса. По данным NASA, аппарат Dawn был запущен 27 сентября 2007 года и достиг Весты в июле 2011 года после гравитационного манёвра у Марса. Интервал между запуском Dawn и началом орбитальных операций у Весты составляет 1388 суток, или примерно 3,80 года²⁰.

Этот пример показывает, что для направлений к внутреннему главному поясу даже выигрыш в десятки процентов означает не часы и не дни, а месяцы и годы. Поэтому сравнение низкоэнергетического, высокоэнергетического и инфраструктурно поддержанного режимов имеет практический смысл уже на масштабе 1–2,5 а.е.. При увеличении масштаба маршрута этот эффект становится ещё важнее: чем дальше последующий баллистический участок и чем больше полное время перелёта, тем сильнее проявляется выигрыш от сокращения начального времени, снижения коррекционной цены и более точного выхода на дальнейшую траекторию.

В настоящей главе используется расчётная постановка 2,5 а.е. → 1,0 а.е., то есть рассматривается переход из области, близкой к внутреннему главному поясу и орбите Весты, к области земной орбиты. Такое направление можно интерпретировать как обратный транспортный режим: от района производственно-логистического узла и дисперсной структуры к внутренней Солнечной системе. Прямая миссия от Земли к области 2,5 а.е. рассматривается аналогично, но с обратным направлением движения.

Этот выбор не означает, что структура предназначена только для маршрута Веста — Земля. Веста используется как миссионный и орбитальный ориентир. Сама расчётная постановка шире: она относится к области внутреннего главного пояса, где может быть размещён первый рабочий инфраструктурный участок.

Почему пример Dawn важен не только для времени перелёта

Для настоящей постановки особенно важно, что расхождение между идеализированной гомановской оценкой и реальной миссионной длительностью связано не только с самим перелётом по межпланетной дуге. Реальная миссия включает архитектуру выхода, коррекции, сближения, торможения и перехода к целевому режиму у объекта. В случае Dawn длительность была связана также с тем, что аппарат использовал малую длительную тягу и не выполнял мгновенное импульсное торможение у Весты. Поэтому часть миссионного времени фактически приходилась на постепенное изменение орбиты и достижение режима, пригодного для орбитальных операций.

Это уточнение важно для сравнения с дисперсной структурой. Орбитально-ориентированный участок может рассматриваться не только как средство

¹⁹ NASA Planetary Data System. 4 Vesta Information Page. Используется для орбитальных параметров Весты, включая большую полуось 2,36151 а.е., и для обоснования связи расчётной области 2,3–2,5 а.е. с внутренней частью Главного пояса астероидов.

https://arcnav.psi.edu/urn:nasa:pds:context:target:asteroid.4_vesta

²⁰ Jet Propulsion Laboratory. Dawn at Vesta. Press Kit. July 2011. Используется как источник по хронологии миссии Dawn, включая дату запуска, гравитационный манёвр у Марса и дату прибытия к Весте, для оценки практической длительности перелёта к объекту Главного пояса астероидов.

https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/dawnatVesta.pdf

поддержки выхода на более энергичную траекторию, но и как потенциальная тормозная или входная инфраструктурная зона у цели. Если в районе Весты или другого объекта внутреннего главного пояса существует подготовленный тормозной участок, аппарат может использовать его для снижения части относительной скорости, стабилизации входа, уменьшения нагрузки на собственную двигательную систему и сокращения длительности этапа сближения.

Поэтому структура должна оцениваться не только как разгонно-направляющий участок при вылете, но и как тормозно-стабилизирующий участок при прибытии. Это не два разных сценария, а две функции одного класса инфраструктурных объектов. В одном месте маршрута структура помогает аппарату войти в целевой режим, в другом — помогает выйти из него на более энергичную траекторию.

Три сравниваемых режима

Для оценки полезного эффекта целесообразно сравнивать не два, а три режима движения.

Первый режим — низкоэнергетическая траектория. В классическом приближении к ней относится гомановский или близкий к нему экономичный перелёт. Его преимущество состоит в относительно малом требуемом импульсе и высокой топливной экономичности. Однако такая схема обычно требует большего времени перелёта, зависит от благоприятных стартовых окон и оставляет ограниченный запас гибкости для изменения траектории после выхода на перелётную дугу.

Второй режим — высокоэнергетическая траектория без дисперсной структуры. Такой режим позволяет уменьшить время перелёта или выйти на более энергичную траекторную конфигурацию, но требует большего Δv от аппарата или разгонного блока. В этом случае выигрыш по времени оплачивается ростом расхода топлива, рабочего тела, требований к разгонному блоку, теплозащите, коррекциям, торможению у цели и точности навигации.

Третий режим — высокоэнергетическая траектория с прохождением через орбитально-ориентированный дисперсный участок. В этом варианте аппарат также использует более энергичную траекторию, но часть импульсной, стабилизирующей, тормозной или корректирующей функции берёт на себя внешняя среда. Тогда инфраструктурный участок не обязан полностью разгонять или полностью тормозить аппарат. Достаточно, чтобы он снижал недостающий импульс, уменьшал требования к коррекциям, демпфировал отклонения, облегчал вход в целевой режим или повышал точность выхода на последующий баллистический участок.

Особенно важно, что прохождение через структуру занимает только ограниченную часть маршрута. Аппарат не летит внутри дисперсной среды всё межпланетное расстояние. Он входит в подготовленный участок, получает направляющее, стабилизирующее, тормозное или корректирующее воздействие, выходит из него и далее большую часть пути движется уже вне дисперсной среды. Поэтому эрозионная и тепловая нагрузка действует только на ограниченном участке прохождения, тогда как полученная коррекция, изменение направления, снижение относительной скорости или стабилизированный режим продолжают проявляться на последующем баллистическом участке. Условно можно сказать, что структура работает как короткая инфраструктурная зона входа, торможения или настройки траектории, после которой аппарат летит в обычном разреженном космическом пространстве, накапливая полезный результат без дальнейшего эрозионного контакта со средой.

Сравнение можно записать так:

- Низкоэнергетическая траектория даёт меньше Δv , но больше время;
- Высокоэнергетическая траектория без участка даёт меньше время, но требует большего Δv и более дорогого торможения или сближения у цели;
- Высокоэнергетическая траектория с участком сохраняет выигрыш по времени, но часть дополнительной цены быстрого режима переносит на инфраструктурную среду.

Именно третий режим является главным для настоящей работы. Он показывает, что смысл дисперсной структуры состоит не в том, чтобы конкурировать с двигателем напрямую, а в том, чтобы сделать более энергичный режим движения менее дорогим, более устойчивым и более повторяемым для каждого отдельного аппарата.

Гомановская база для участка 2,5 а.е. -> 1 а.е.

Гомановский перелёт удобен как базовая низкоэнергетическая оценка, поскольку для идеального перехода между круговыми компланарными орбитами время перелёта равно половине периода переходного эллипса. Такая постановка стандартно используется как базовая оценка экономичного двухимпульсного перелёта между круговыми орбитами.

Для перехода $r_1 = 2,5$ а.е. и $r_2 = 1,0$ а.е. большая полуось переходного эллипса равна $a_h = (r_1 + r_2) / 2 = (2,5 + 1,0) / 2 = 1,75$ а.е..

В годах, если большая полуось выражена в а.е., период орбиты можно оценить через третий закон Кеплера:

$$T_{\text{orbit}} = \sqrt{(a_h^3)}$$

где:

- r_1 — радиус начальной орбиты (в данном случае 2,5 а.е.);
- r_2 — радиус конечной орбиты (в данном случае 1,0 а.е.);
- a_h — большая полуось переходной гомановской орбиты;
- T_{orbit} — время полного оборота аппарата по переходной гомановской орбите вокруг Солнца. Для гомановского перехода между орбитами используется половина этого периода.

Здесь используется стандартная форма третьего закона Кеплера для орбит вокруг Солнца, при которой большая полуось выражается в а.е., а период — в земных годах.

Для $a_h = 1,75$ а.е. получаем $1,75^3 \sim 5,36$, а значит $T_{\text{orbit}} \sim 2,31$ года.

Гомановский перелёт занимает половину этого периода:

$$T_h = T_{\text{orbit}} / 2 \sim 1,16 \text{ года, или примерно 423 суток.}$$

где T_h — время перелёта аппарата между орбитами по гомановской траектории.

Поскольку при гомановском переходе аппарат проходит только половину переходной орбиты, время перелёта равно половине периода обращения по этой орбите.

Таким образом, идеализированная гомановская база для перехода 2,5 а.е. -> 1 а.е. составляет порядок $T_{\text{low}} \sim 423$ суток.

Эта величина короче, чем реальная длительность миссии Dawn к Весте, поскольку Dawn не являлась простым гомановским перелётом к круговой орбите 2,5 а.е.. Она

включала конкретное окно старта, гравитационный манёвр у Марса, длительную электрореактивную тягу, сближение, торможение и переход к орбитальным операциям у Весты.

Миссия Dawn использовалась для исследования Весты и Цереры; NASA отмечает её как первую миссию, достигшую орбиты вокруг объекта главного пояса астероидов.

Поэтому 423 суток следует понимать как идеализированную низкоэнергетическую базу, а 1388 суток миссии Dawn — как реальный миссионный ориентир для области главного пояса. Именно сопоставление этих величин показывает, почему практический расчёт должен учитывать не только чистую небесную механику, но и архитектуру миссии. В реальном полёте время может существенно возрасти из-за ограничений двигателя, окна старта, коррекций, сближения, торможения, режима научной миссии и целевой операции у объекта.

Высокоэнергетический режим без структуры

Высокоэнергетический режим возникает тогда, когда аппарат или разгонный блок выбирает более быструю траекторную конфигурацию, чем экономичная низкоэнергетическая схема. В такой постановке сокращение времени достигается не бесплатно. Оно требует большей энергии, большей скорости ухода или более жёсткого режима коррекций.

Пусть низкоэнергетическая траектория требует от аппарата или разгонного блока суммарного импульса Δv_{low} , а высокоэнергетическая траектория без дисперсной структуры требует Δv_{high} . При этом $\Delta v_{high} > \Delta v_{low}$, а дополнительная цена перехода к более быстрой траектории равна :

$$\Delta v_{extra} = \Delta v_{high} - \Delta v_{low}$$

Если эту дополнительную скорость должен полностью обеспечить аппарат, то возрастает расход топлива или рабочего тела. В первом приближении дополнительную массу топлива можно оценивать через эффективную скорость истечения:

$$\Delta m_{prop} \sim M_{app} * \Delta v_{extra} / v_e,$$

где:

- Δv_{low} (low-energy delta-v) — суммарные затраты импульса скорости для низкоэнергетической траектории;
- Δv_{high} (high-energy delta-v) — суммарные затраты импульса скорости для высокоэнергетической траектории без использования дисперсной структуры;
- Δv_{extra} (additional delta-v) — дополнительный импульс скорости, необходимый для перехода от низкоэнергетической к высокоэнергетической траектории;
- Δm_{prop} (additional propellant mass) — дополнительная масса топлива или рабочего тела, требуемая для обеспечения импульса Δv_{extra} ;
- M_{app} (spacecraft mass) — масса аппарата или связки «аппарат + разгонный блок»;
- v_e (effective exhaust velocity) — эффективная скорость истечения рабочего тела.

Эта запись используется как линейное оценочное приближение при малом отношении $\Delta v_{extra} / v_e$. Более точный расчёт выполняется по уравнению Циолковского.

При этом важно различать саму высокоэнергетическую траекторию и выход на неё. После того как аппарат уже выведен на нужную траекторную конфигурацию, значительная часть пути проходит в баллистическом или слабокорректируемом режиме. Основная энергетическая цена связана не с «движением по траектории» как таковым, а с переходом на неё: разгоном, формированием нужного

направления, попаданием в допустимое окно, коррекциями начальных ошибок и стабилизацией аппарата в критической зоне входа.

Аналогичная ситуация возникает при прибытии к цели. Быстрая траектория может сократить время перелёта, но затем аппарат должен войти в режим сближения, уменьшить относительную скорость, попасть в допустимое окно захвата или орбитальной операции и выполнить торможение. Если всю эту цену несёт сам аппарат, то выигрыш по времени оплачивается не только разгоном на старте, но и повышенной ценой прибытия.

Именно поэтому высокоэнергетический режим без структуры является быстрым, но более дорогим: он выигрывает время, но увеличивает требования к бортовому запасу, коррекциям, навигации, торможению и допустимым ошибкам.

Высокоэнергетический режим со структурой

Высокоэнергетический режим со структурой отличается от предыдущего не тем, что структура заменяет двигатель. Аппарат всё равно должен иметь собственную двигательную систему, разгонный блок или иной способ выхода на требуемую траекторию. Различие состоит в том, что часть дополнительной цены быстрого режима может быть перенесена на внешнюю среду.

Первый и наиболее очевидный способ участия структуры — прямой импульсный вклад. Аппарат или защитно-стабилизирующий модуль получает малый, но интегральный импульс от взаимодействия с направленной дисперсной средой. Этот вклад можно записать как

$$\Delta v_{\text{dust}} = J_{\text{dust}} / M_{\text{app}},$$

где:

- Δv_{dust} (dust-induced delta-v) — эквивалентное изменение скорости, создаваемое взаимодействием аппарата с дисперсной средой;
- J_{dust} (dust impulse) — интегральный импульс, полученный аппаратом при прохождении участка структуры;
- M_{app} (spacecraft mass) — масса аппарата или связки «аппарат + разгонный блок».

В теоретической части было показано, что

$$J_{\text{dust}} \sim C_{\text{eff}} * \rho_{\text{dust}} * A_{\text{eff}} * v_{\text{rel},a} * L,$$

следовательно,

$$\Delta v_{\text{dust}} \sim C_{\text{eff}} * \rho_{\text{dust}} * A_{\text{eff}} * v_{\text{rel},a} * L / M_{\text{app}}$$

Этот вклад может быть малым по сравнению с полным Δv_{high} , но он важен, если заменяет наиболее дорогую часть бортовой коррекции или позволяет уменьшить запас топлива на серии аппаратов. Однако в первом сценарии ещё важнее не сам прямой импульс, а стабилизационно-коррекционная и тормозно-входная функция участка.

В высокоэнергетической траектории большая часть цены связана с выходом на нужный режим: нужно получить правильное направление, правильную скорость, правильное окно входа и допустимый разброс начальных условий. После выхода на такую траекторию аппарат основную часть пути уже не “тратит топливо на движение”, а летит по сформированной баллистической дуге, выполняя только необходимые коррекции. Поэтому участок, который помогает точнее войти в высокоэнергетический режим, демпфировать поперечные отклонения, снизить требования к активной стабилизации и уменьшить объём последующих коррекций, работает именно в той зоне, где цена ошибки особенно высока.

При прибытии к цели аналогичная логика работает в обратном направлении. Аппарат должен не только долететь до района цели, но и уменьшить относительную скорость, войти в допустимый коридор сближения, выполнить торможение или подготовиться к захвату на орбиту. Если в районе цели существует тормозно-входной дисперсный участок, он может снизить часть этой цены. Такой участок не обязан полностью захватывать аппарат. Достаточно, чтобы он уменьшал часть тормозного импульса, демпфировал отклонения, снижал требования к коррекциям и облегчал достижение целевого режима.

Второй способ участия структуры — коррекционный вклад. Среда может уменьшать суммарную величину коррекций, которые аппарат должен был бы выполнять собственным двигателем. В этом случае выигрыш выражается не только в Δv_{dust} , но и в снижении Δv_{corr} , то есть суммарной скорости, которую аппарат должен был бы потратить на исправление отклонений.

Третий способ — стабилизационный вклад. Если взаимодействие с защитно-стабилизирующим модулем снижает поперечные отклонения, демпфирует вход в выбранный коридор или уменьшает требования к активной ориентации, то часть нагрузки снимается с бортовых систем управления. Для первого участка эта функция является одной из центральных: структура не обязана “толкать” аппарат как двигатель, но она может сделать прохождение высокоэнергетического режима более устойчивым.

Четвёртый способ — входной или тормозной вклад. Если участок расширяет допустимое окно входа в высокоэнергетическую траекторию, снижает чувствительность к малым ошибкам или помогает уменьшить относительную скорость при прибытии, он уменьшает требования к навигации, коррекционным манёврам и торможению.

Пятый способ — инфраструктурный вклад. Один и тот же участок может использоваться многократно. Тогда даже малый эффект на один аппарат становится значимым на серии проходов.

Поэтому полезный эффект структуры следует записывать не только как прямой Δv_{dust} , а как суммарное снижение бортовой цены высокоэнергетического режима:

$$\Delta v_{\text{saved}} = \Delta v_{\text{dust}} + \Delta v_{\text{corr,saved}} + \Delta v_{\text{brake,saved}} + \Delta v_{\text{equiv,stab}}$$

где:

- Δv_{saved} (total saved delta-v) — суммарное эффективное снижение требуемого бортового импульса;
- Δv_{dust} (dust-induced delta-v) — прямой импульсный вклад, создаваемый взаимодействием аппарата с дисперсной средой;
- $\Delta v_{\text{corr,saved}}$ (saved correction delta-v) — снижение затрат импульса на коррекции траектории;
- $\Delta v_{\text{brake,saved}}$ (saved braking delta-v) — снижение затрат импульса на торможение, захват или вход в рабочий режим у цели;
- $\Delta v_{\text{equiv,stab}}$ (equivalent stabilization delta-v) — эквивалентное снижение бортовой цены, возникающее за счёт уменьшения затрат на стабилизацию, удержание режима и поддержание требуемых параметров движения.

Тогда оставшаяся цена высокоэнергетической траектории для аппарата может быть записана как

$$\Delta v_{\text{high,with}} = \Delta v_{\text{high}} - \Delta v_{\text{saved}},$$

а если сравнивать только дополнительную цену относительно низкоэнергетической траектории, то

$$\Delta v_{\text{extra,with}} = \Delta v_{\text{extra}} - \Delta v_{\text{saved}}$$

Если

$$\Delta v_{\text{saved}} > 0,$$

где:

- $\Delta v_{\text{high,with}}$ (high-energy delta-v with structure) — требуемый бортовой импульс для высокоэнергетической траектории с учётом вклада дисперсной структуры;
- $\Delta v_{\text{extra,with}}$ (additional delta-v with structure) — дополнительная цена высокоэнергетической траектории относительно низкоэнергетического режима с учётом вклада структуры;
- Δv_{extra} (additional delta-v) — дополнительный импульс, необходимый для перехода от низкоэнергетической к высокоэнергетической траектории без использования структуры.

Это означает, что часть бортовых затрат импульса компенсируется за счёт прохождения участка структуры. В результате высокоэнергетическая траектория требует меньших затрат рабочего тела, чем аналогичная траектория без использования дисперсной среды.

Две функции структуры в одной транспортной схеме

В рамках первого сценария структуру не следует связывать только с разгоном или только с выходом на высокоэнергетическую траекторию. Один и тот же класс орбитально-ориентированных дисперсных участков может выполнять две разные функции в разных частях транспортной схемы.

Первая функция — тормозно-входная. Она относится к прибытию аппарата в область цели, например к району Весты или внутреннего главного пояса. В этом случае аппарат входит в подготовленный дисперсный участок, где часть относительной скорости, поперечного отклонения или ошибки входа может быть погашена внешней средой. Такой участок не обязан полностью захватывать аппарат на орбиту. Достаточно, чтобы он снижал часть тормозной цены, уменьшал длительность сближения, облегчал последующие манёвры и снижал требования к запасу рабочего тела.

Вторая функция — разгонно-направляющая. Она относится к вылету из области производственно-логистического узла или района Весты в сторону внутренней Солнечной системы. В этом случае участок помогает аппарату выйти на более энергичную траекторию, стабилизировать направление, уменьшить часть коррекционной цены и повысить точность последующего баллистического движения.

Обе функции принадлежат одной инфраструктурной логике. В первом случае структура уменьшает цену прибытия и торможения. Во втором случае она уменьшает цену выхода и ускорения. Поэтому правильное сравнение должно учитывать не один локальный эффект, а возможность размещения подготовленных участков в ключевых местах траектории: там, где аппарат должен либо войти в целевой режим, либо выйти из него на новую высокоэнергетическую дугу.

При этом эти две функции не исчерпывают всех возможных применений среды. В следующей главе отдельно рассматриваются другие полезные функции дисперсного участка: расширение окна входа, внешняя стабилизация, снижение коррекционной цены, перераспределение полезной массы, повторяемость прохождения, суммирование эффекта на серии аппаратов и баллистическое

накопление результата после выхода из структуры. В настоящей главе тормозно-входной и разгонно-направляющий участки используются как два наиболее наглядных примера, позволяющих получить количественный результат в рамках одной транспортной логики.

Эта постановка особенно важна на фоне миссии Dawn. Идеализированный гомановский переход 2,5 а.е. $\rightarrow$ 1 а.е. даёт порядок 423 суток, но реальная миссия Dawn к Весте заняла 1388 суток до начала орбитальных операций. Разница связана не только с расстоянием, но и с архитектурой миссии: режимом тяги, коррекциями, сближением, торможением и переходом к орбитальному этапу. Следовательно, инфраструктурный участок у цели мог бы иметь ценность не только как средство экономии топлива, но и как средство сокращения времени, затрачиваемого на достижение рабочего режима у объекта.

Для прибытия к цели полезный эффект структуры можно рассматривать как сумму снижения тормозной цены, снижения цены коррекций и снижения затрат на стабилизацию. Для вылета из области цели или производственно-логистического узла аналогичный эффект выражается через прямой импульсный вклад, снижение коррекций и снижение затрат на стабилизацию. Таким образом, структура может иметь два количественно оцениваемых вклада в одной транспортной архитектуре: сокращение цены прибытия и сокращение цены вылета.

Устойчивый и эффективный варианты высокоэнергетического режима

Для первого расчётного сценария не нужно утверждать единственную точную высокоэнергетическую траекторию. Достаточно задать два предельных режима использования того же участка: устойчивый и эффективный.

Устойчивый высокоэнергетический вариант соответствует умеренному сокращению времени при умеренном росте энергетической цены. Его можно задать как

$$T_{\text{high,stable}} = 0,8 * T_h$$

При $T_h = 423$ суток получаем $T_{\text{high,stable}} \sim 338$ суток. Выигрыш по времени составляет $423 - 338 = 85$ суток, или примерно 20 %.

Эффективный высокоэнергетический вариант соответствует более сильному сокращению времени при более высокой дополнительной энергетической цене. Его можно задать как

$$T_{\text{high,effective}} = 0,5 * T_h$$

При $T_h = 423$ суток получаем $T_{\text{high,effective}} \sim 212$ суток. Выигрыш по времени составляет $423 - 212 = 211$ суток, или примерно 50 %.

Эти два режима не означают, что предлагаются две разные структуры. Участок остаётся тем же: область около 2,5 а.е. и связанный с ней орбитально-ориентированный дисперсный коридор. Меняется способ его использования: более осторожный режим даёт меньший выигрыш по времени и меньшую дополнительную цену, более эффективный режим даёт больший выигрыш по времени, но требует большей компенсации со стороны аппарата и инфраструктуры.

Сокращение времени на 20–50 % относится не к прямому действию дисперсной структуры, а к переходу от низкоэнергетической траектории к более энергичной. Роль структуры состоит в том, чтобы уменьшить дополнительную энергетическую, коррекционную, тормозную и стабилизационную цену такого перехода. Поэтому даже если структура компенсирует только часть цены высокоэнергетического

режима, она может быть связана с крупным выигрышем по времени: от месяцев до лет в зависимости от расстояния, траектории и класса миссии.

Для дальних направлений этот эффект может возрасти. Например, NASA указывает, что гравитационный манёвр New Horizons у Юпитера увеличил скорость аппарата примерно на 14 000 км/ч и сократил перелёт к Плутону на три года²¹. Этот пример не является прямым аналогом дисперсной структуры, но показывает общий миссионный принцип: внешняя помощь, не сводимая к бортовому топливу аппарата, может давать крупный выигрыш по времени.

При этом гравитационные манёвры и дисперсная структура не должны рассматриваться как конкурирующие способы. Они могут входить в одну и ту же миссионную архитектуру. Гравитационный манёвр использует движение массивного тела и может дать крупное изменение скорости или направления, а дисперсный участок может дополнительно снизить цену входа, выхода, торможения, стабилизации или коррекций в заранее выбранной зоне. Совокупное применение внешней гравитационной помощи и подготовленной дисперсной среды потенциально даёт больший выигрыш, чем каждый из этих механизмов по отдельности.

В настоящей практической главе основной расчёт всё же ограничивается направлением 2,5 а.е. → 1 а.е., поскольку именно оно связано с выбранной областью первого инфраструктурного участка.

Количественная оценка выигрыша по топливу и полезной массе

Для практической оценки нужно задать условную дополнительную цену быстрого режима. Пусть переход от низкоэнергетического режима к более быстрому требует дополнительного импульса 400 м/с. Это не универсальная величина, а демонстрационный параметр, позволяющий показать масштаб результата.

Для аппарата массой 1000 кг и эффективной скорости истечения 3000 м/с полная дополнительная цена такого быстрого режима без структуры соответствует примерно 133 кг топлива или рабочего тела в линейном приближении.

Если дисперсный участок компенсирует только 10–20 % дополнительной цены быстрого режима, то экономия составляет 40–80 м/с, что для аппарата массой 1000 кг даёт примерно 13–27 кг топлива на один аппарат.

Если участок компенсирует 30–50 % дополнительной цены, то экономия составляет 120–200 м/с, что даёт примерно 40–67 кг топлива на один аппарат.

Эти величины не следует понимать как автоматическое увеличение чистой полезной нагрузки на ту же массу. Аппарат, проходящий через дисперсную среду, может требовать защитно-стабилизирующего модуля, экрана, вынесенной рабочей поверхности или усиления отдельных элементов. Такая защита тоже имеет массу и может занять часть выигранного резерва. Поэтому корректнее говорить не о прямом добавлении 40–67 кг полезной нагрузки, а о перераспределении массы аппарата. Сэкономленное топливо может быть частично направлено на защиту,

²¹ NASA Science. New Horizons Mission Overview. Используется не как база расчёта настоящей главы, а как пример того, что внешняя помощь, не связанная с расходом собственного топлива аппарата, может обеспечивать значительный выигрыш по скорости и времени перелёта. В качестве примера NASA приводит гравитационный манёвр New Horizons у Юпитера, увеличивший скорость аппарата примерно на 14 000 км/ч и сокративший перелёт к Плутону примерно на три года.

<https://science.nasa.gov/mission/new-horizons>

частично — на полезную нагрузку, частично — на запас рабочего тела, ресурс службы или повышение безопасности.

Даже если защитно-стабилизирующий модуль полностью поглощает часть экономии одного аппарата, инфраструктурный смысл не исчезает. Защита является не потерей, а элементом допуска аппарата к новому режиму движения. Если за счёт неё аппарат может использовать более быстрый режим, входить в подготовленный коридор, снижать цену коррекций и повторять такие проходы в серии, то масса защиты становится частью инфраструктурной архитектуры, а не простым штрафом.

Для одного аппарата экономия может выглядеть умеренной. Однако при серии аппаратов эффект суммируется. Если через участок проходит 100 аппаратов сходного класса, то устойчивый вариант даёт суммарную экономию порядка 1,3–2,7 т топлива или эквивалентной массы. Эффективный вариант даёт уже порядка 4,0–6,7 т. Эта масса может быть перераспределена между защитой, полезной нагрузкой, научным оборудованием, рабочим телом для других операций, увеличенным ресурсом службы или запасом безопасности.

Следовательно, для практической оценки важно не только то, сколько топлива экономит один аппарат. Важно, что один и тот же участок может многократно снижать цену быстрого режима для серии аппаратов. Именно это переводит эффект из категории локального выигрыша в категорию инфраструктурного результата.

Количественная оценка тормозно-входного участка у цели

Отдельно нужно учитывать возможность тормозно-входного участка у цели. На примере Dawn видно, что реальная миссия к Весте включала длительное сближение, торможение и переход к орбитальным операциям. Если в районе цели существует подготовленный дисперсный участок, он может уменьшать не только расход топлива, но и длительность этапа достижения рабочего режима у объекта.

Для первого расчётного примера можно использовать такую же условную величину дополнительной цены — 400 м/с, но применить её не к выходу на быстрый режим, а к тормозно-сближающему этапу. Если тормозно-входной участок компенсирует 10–20 % этой цены, то аппарат получает эквивалент экономии 40–80 м/с, то есть примерно 13–27 кг топлива для аппарата массой 1000 кг при эффективной скорости истечения 3000 м/с.

Если компенсация достигает 30–50 %, то эквивалент экономии составляет 120–200 м/с, или примерно 40–67 кг топлива на один аппарат. Для серии из 100 аппаратов это снова даёт диапазон порядка 1,3–6,7 т эквивалентной массы.

Однако тормозно-входной участок имеет ещё один эффект, который не сводится к килограммам топлива. Если он сокращает длительное сближение, торможение или переход к рабочему режиму у цели хотя бы на 10–20 %, то при длительном этапе в несколько месяцев выигрыш выражается уже неделями. Если же у аппарата, подобного Dawn по логике длительной тяги и постепенного сближения, тормозной участок сокращает наиболее растянутую часть входа в целевой режим на 30–50 %, выигрыш может составлять месяцы.

В настоящей главе не утверждается, что для Dawn такой участок уже существовал или что его эффект можно точно посчитать без полного моделирования траектории. Смысл расчёта другой: показать, что при правильном сравнении структура может давать количественный эффект не только при вылете на высокоэнергетическую траекторию, но и при прибытии к цели. Поэтому транспортная архитектура с двумя

участками — тормозным у цели и разгонно-направляющим при вылете — потенциально даёт двойной выигрыш: сокращает цену входа в целевой режим и цену выхода из него.

Важно, что орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура не обязана быть однородной по всей длине. Разные участки могут иметь различные функции и, соответственно, разные параметры фракции, плотности, морфологии частиц и допустимой относительной скорости. Разгонно-направляющий участок может использовать более жёсткую и устойчивую фракцию, рассчитанную на воспроизводимую передачу импульса, тогда как тормозной или демпфирующий участок может быть ориентирован на более диссипативный контакт, при котором часть энергии взаимодействия расходуется на деформацию, разрушение или скольжение частиц с меньшей эрозионной ценой для защитного модуля.

Суммарное различие трёх режимов можно представить в виде таблицы.

Параметр	Гомановский / низкоэнергетический режим	Высокоэнергетический режим без структуры	Высокоэнергетический режим со структурой
Основная логика	Минимизация энергетической цены	Сокращение времени за счёт большей энергетической цены	Сокращение времени при частичном переносе цены на инфраструктурную среду
Расчётный участок	2,5 а.е. -> 1 а.е.	2,5 а.е. -> 1 а.е.	тот же участок
Расчётное время	~ 423 суток	~ 338–212 суток	~ 338–212 суток
Выигрыш по времени относительно гомановского режима	0 %	20–50 %	20–50 %
Абсолютный выигрыш по времени	0	~ 85–211 суток	~ 85–211 суток
Энергетическая цена	минимальная в идеализированной схеме	повышенная	повышенная, но часть дополнительной цены компенсируется средой
Главная цена режима	ожидание и привязка к окнам	выход на высокоэнергетическую траекторию,	та же высокоэнергетическая траектория, но с

Параметр	Гомановский / низкоэнергетический режим	Высокоэнергетический режим без структуры	Высокоэнергетический режим со структурой
		коррекции, точность и торможение у цели	внешней поддержкой входа, стабилизации, коррекции и торможения
Дополнительная цена быстрого режима	0	условно 400 м/с в примере	часть этой цены компенсируется: 40– 80 м/с в устойчивом варианте и 120–200 м/с в эффективном
Экономия топлива на одном аппарате 1000 кг	0	0	13–27 кг в устойчивом варианте; 40–67 кг в эффективном
Экономия на серии 100 аппаратов	0	0	1,3–2,7 т в устойчивом варианте; 4,0–6,7 т в эффективном
Масса защиты	не требуется для дисперсной среды	не требуется для дисперсной среды	может занять часть экономии, но одновременно открывает доступ к новому режиму движения
Прибытие и торможение у цели	выполняется за счёт архитектуры и миссии и двигательной системы	требует повышенной цены сближения, торможения и коррекций	часть тормозной, входной или стабилизационной функции может быть перенесена на подготовленный участок у цели
Использование структуры	отсутствует	отсутствует	возможно в двух местах: тормозной участок у цели и разгонно- направляющий участок при вылете
Совместимость с	возможна	возможна	возможна; гравитационная

Параметр	Гомановский / низкоэнергетический режим	Высокоэнергетический режим без структуры	Высокоэнергетический режим со структурой
гравитационным и манёврами			помощь и дисперсный участок могут суммировать эффект
Прямой вклад дисперсной среды	отсутствует	отсутствует	обычно малый по сравнению с полным Δv_{high} , но входит в суммарный эффект
Коррекционная цена	ограниченная гибкость, экономичный режим	повышенная из-за чувствительности быстрого режима	снижена за счёт внешней направляющей и стабилизирующей среды
Эрозионная нагрузка	отсутствует	отсутствует	действует только на ограниченном участке прохождения через структуру
Основная часть пути	баллистический или слабокорректируемый полёт	баллистический или слабокорректируемый полёт	после выхода из структуры — баллистический или слабокорректируемый полёт без дальнейшей эрозионной нагрузки
Окно входа	определяется обычной навигацией	чувствительно к ошибкам высокоэнергетического режима	может быть расширено рабочим коридором структуры
Стабилизация	обеспечивается аппаратом	обеспечивается аппаратом с повышенными требованиями	частично поддерживается взаимодействием со средой и защитно-стабилизирующим модулем
Повторяемость	зависит от стартовых окон и параметров миссии	требует повторного обеспечения высокой точности и энергии	повышается за счёт повторного использования

Параметр	Гомановский / низкоэнергетический режим	Высокоэнергетический режим без структуры	Высокоэнергетический режим со структурой
			одного и того же участка
Инфраструктурный смысл	экономичный, но медленный режим	быстрый, но дорогой режим	быстрый режим, часть цены которого перенесена на обслуживаемую среду

Эта таблица показывает, почему структура не должна сравниваться с гомановским переходом напрямую по принципу “что требует меньше энергии”. Гомановский режим уже является экономичным. Его недостаток — время, зависимость от окон и ограниченная гибкость. Высокоэнергетический режим решает часть этих проблем, но создаёт новую цену: рост Δv , коррекций, требований к стабилизации, точности и торможению у цели.

Дисперсная структура входит именно в это место сравнения. Она не делает высокоэнергетический режим бесплатным, но может уменьшить его дополнительную цену. Поэтому её главный конкурент — не гомановская траектория и не двигатель как таковой, а высокоэнергетическая траектория без подготовленной внешней среды. Именно это позволяет, снижая цену высокоэнергетических переходов, использовать их чаще, делать быстрые траектории менее исключительными и постепенно масштабировать серию полётов.

Что именно сравнивается в дальнейшем

После такого разделения становится ясно, какие величины должны сравниваться в следующей главе.

Первая группа — временные параметры: низкоэнергетическая длительность, высокоэнергетическая длительность и выигрыш по времени. В выбранном примере это переход от 423 суток к 338 суткам в устойчивом варианте и к 212 суткам в эффективном варианте.

Вторая группа — импульсные параметры: дополнительная цена быстрого режима и та её часть, которую может компенсировать структура. В выбранном примере условная дополнительная цена задаётся как 400 м/с, а компенсация составляет 40–80 м/с в устойчивом варианте и 120–200 м/с в эффективном.

Третья группа — параметры прибытия и торможения. Тормозно-входной участок у цели может уменьшать часть цены сближения, торможения и перехода к целевому режиму. В первом расчётном примере тот же диапазон компенсации даёт эквивалент экономии 13–67 кг топлива на один аппарат массой 1000 кг, а на серии из 100 аппаратов — до нескольких тонн эквивалентной массы.

Четвёртая группа — коррекционные и стабилизационные параметры. Они выражаются не только в килограммах топлива, но и в уменьшении требований к точности входа, ориентации, запасу рабочего тела и допустимым ошибкам.

Пятая группа — инфраструктурные параметры: число проходов, суммарная экономия или перераспределение массы, повторяемость использования участка и возможность применять один и тот же участок для серии аппаратов.

Эти величины относятся к разным уровням. Время перелёта сравнивает низкоэнергетический и высокоэнергетический режимы. Экономия топлива сравнивает высокоэнергетический режим со структурой и без неё. Тормозно-входной эффект показывает возможную пользу участка у цели. Расширение окна входа показывает не топливную экономию, а снижение требований к навигации. Серия аппаратов показывает, как умеренный эффект одного прохода превращается в инфраструктурный результат.

Поэтому дальнейший анализ не должен пытаться свести весь выигрыш к одной цифре. Инфраструктурный эффект состоит в совокупности изменений: времени, импульса, коррекций, торможения, окна входа, стабилизации, повторяемости и полезной нагрузки.

Ограничения расчёта

В настоящей главе не выполняется точный расчёт конкретной межпланетной траектории. Для этого необходимо выбрать конкретные тела, дату старта, окно перелёта, начальную орбиту, конечную орбиту, массу аппарата, двигательную установку, параметры защитно-стабилизирующего модуля, геометрию входа, положение дисперсного участка и режим торможения у цели.

Задача настоящей главы другая: показать, какие режимы должны сравниваться, чтобы оценить инфраструктурный выигрыш, и дать первый количественный пример. Поэтому используются условные, но прозрачные величины: переход 2,5 а.е. -> 1 а.е., гомановская база 423 суток, высокоэнергетические варианты 338 и 212 суток, условная дополнительная цена быстрого режима 400 м/с, аппарат массой 1000 кг, эффективная скорость истечения 3000 м/с и серия из 100 аппаратов.

Такой подход позволяет не утверждать готовый проект траектории, но уже получить численный результат: выигрыш по времени 85–211 суток, экономию 13–67 кг топлива или эквивалентной массы на один аппарат, 1,3–6,7 т на серии из 100 аппаратов, а также потенциальное сокращение длительного сближения или торможения у цели на недели или месяцы при наличии тормозно-входного участка.

Итог главы

В этой главе первый участок был рассмотрен не как абстрактное облако пыли и не как замена двигателю, а как внешний инфраструктурный элемент, который может уменьшать цену быстрого режима движения. Поэтому главным сравнением является не “структура против двигателя”, а “высокоэнергетическая траектория без структуры против высокоэнергетической траектории со структурой”.

На расчётном участке 2,5 а.е. -> 1 а.е. низкоэнергетическая гомановская база даёт порядок 423 суток. Переход к устойчивому высокоэнергетическому варианту сокращает это время примерно до 338 суток, то есть даёт выигрыш около 85 суток. Более эффективный вариант сокращает время до 212 суток, то есть даёт выигрыш около 211 суток. Для направлений к внутреннему главному поясу это уже означает месяцы, а при увеличении масштаба маршрута значение такого выигрыша возрастает.

Сравнение с миссией Dawn показывает, что реальная миссионная длительность может быть значительно больше идеализированной оценки. От запуска Dawn до начала орбитальных операций у Весты прошло 1388 суток. Это связано не только

с перелётом, но и с общей архитектурой миссии: режимом тяги, коррекциями, сближением, торможением и переходом к рабочему режиму у объекта. Поэтому дисперсная структура может иметь практический смысл не только как разгонно-направляющий участок при вылете, но и как тормозно-входной участок у цели.

В выбранном числовом примере условная дополнительная цена быстрого режима составляет 400 м/с. Если структура компенсирует 10–20 % этой цены, один аппарат массой 1000 кг получает эквивалент 13–27 кг топлива или рабочего тела. Если компенсация достигает 30–50 %, эквивалент возрастает до 40–67 кг на один аппарат. Это не следует понимать как автоматическое увеличение полезной нагрузки на ту же величину: часть выигрыша может быть израсходована на защитно-стабилизирующий модуль. Однако даже в этом случае масса не теряется, а перераспределяется в пользу нового режима движения: защиты, устойчивости, коррекционного запаса, полезной нагрузки или ресурса службы.

На серии из 100 аппаратов тот же эффект даёт уже инфраструктурный масштаб: от 1,3–2,7 т эквивалентной массы в устойчивом варианте до 4,0–6,7 т в эффективном. Именно здесь проявляется главное отличие инфраструктуры от разового устройства. Один проход может дать умеренный выигрыш, но многократное использование одного и того же участка превращает этот выигрыш в повторяемое снижение цены полётов.

Тормозно-входной участок у цели добавляет второй практический канал пользы. Он может уменьшать цену сближения, снижать тормозную нагрузку на аппарат и сокращать длительный переход к рабочему режиму у объекта. В числовом выражении его эффект может быть сопоставим с разгонно-направляющим участком: десятки килограммов эквивалентной массы на один аппарат и тонны на серии. Во временном выражении такой участок может сокращать длительные этапы сближения и торможения на недели или месяцы.

При этом структура не обязана работать в одиночку. Она совместима с обычными средствами межпланетной навигации, двигателями, гравитационными манёврами и другими видами внешней помощи. Гравитационный манёвр может дать крупное изменение скорости или направления, а дисперсный участок — дополнительно снизить цену входа, выхода, коррекций, стабилизации или торможения в выбранной зоне. Совокупная архитектура таких средств потенциально даёт больший выигрыш, чем каждый механизм по отдельности.

Кометные пылевые следы демонстрируют²², что сама идея протяжённого дисперсного участка не противоречит наблюдаемым процессам Солнечной системы. Однако естественный след отличается от инфраструктурной структуры тем, что не предназначен для обслуживания аппаратов и не обеспечивает требуемой фазовой согласованности, плотности и повторяемости параметров. Поэтому переход от естественного рабочего профиля к инфраструктурной среде аналогичен переходу от естественной гавани к построенному порту.

²² Sykes M. V., Walker R. G. Cometary Dust Trails // *Icarus*. 1992. Vol. 95. No. 1. P. 180–210. Используется как подтверждение существования естественных протяжённых дисперсных структур в Солнечной системе в виде кометных пылевых следов, состоящих из крупных частиц и сохраняющихся вдоль орбит родительских тел. В настоящей работе рассматривается как физический аналог протяжённого дисперсного участка, но не как пример управляемой инфраструктурной среды.
[https://doi.org/10.1016/0019-1035\(92\)90037-8](https://doi.org/10.1016/0019-1035(92)90037-8)

Природная форма показывает возможность, но инфраструктурное значение появляется только после организации, обслуживания, диагностики и включения в регулярную транспортную систему.

Главный практический вывод состоит в том, что первый участок делает быстрые траектории не бесплатными, но более доступными. Он снижает их дополнительную цену, уменьшает часть требований к аппарату, может перераспределять массу с топлива на защиту и полезные функции, помогает при прибытии к цели и становится особенно ценным при серии аппаратов. Поэтому его оправдание возникает не из одного прохода, а из повторяемого использования: чем чаще участок снижает цену высокоэнергетического режима, тем быстрее он превращается из экспериментальной среды в инфраструктурный элемент.

Дальнейший анализ должен рассмотреть, за счёт чего именно возникает этот выигрыш: через прямой импульсный вклад Δv_{dust} , снижение коррекционной цены, расширение окна входа, внешнюю стабилизацию, тормозно-входную функцию у цели, суммирование эффекта на серии аппаратов и баллистическое накопление результата после выхода из структуры.

26. Механизмы инфраструктурного выигрыша: импульс, коррекции, окно входа, стабилизация и баллистическое накопление

В предыдущей главе первый участок был рассмотрен в практическом сравнении трёх режимов движения: низкоэнергетической траектории, высокоэнергетической траектории без дисперсной структуры и высокоэнергетической траектории с прохождением через инфраструктурный участок. Было показано, что главный выигрыш структуры состоит не в замене двигателя, а в снижении цены быстрого режима: уменьшении части дополнительного импульса, снижении коррекционной нагрузки, помощи при торможении у цели, расширении допустимого окна входа, перераспределении массы аппарата и повторяемом использовании одного и того же участка.

Поэтому каждый из рассматриваемых механизмов не должен интерпретироваться как самостоятельная замена двигательной установки. В инфраструктурной постановке выигрыш возникает за счёт совместного действия нескольких факторов: прямого импульсного вклада, снижения коррекционной цены, расширения допустимого окна входа, стабилизирующего воздействия и последующего баллистического накопления результата. Даже если вклад каждого механизма по отдельности оказывается умеренным, их совокупное действие может изменять требования к выбору траектории и режиму движения аппарата.

В настоящей главе необходимо раскрыть, за счёт чего именно возникает этот выигрыш. Это важно потому, что прямой импульсный вклад дисперсной среды может быть небольшим, и если рассматривать только его, смысл структуры легко занизить. Инфраструктурный эффект возникает не из одного механизма, а из совокупности нескольких функций среды, аппарата и производственно-логистического узла.

Первый участок работает не как самостоятельный двигатель, а как ограниченная зона взаимодействия. Аппарат входит в подготовленную дисперсную среду, проходит через неё, получает импульсное, стабилизирующее, корректирующее или тормозное воздействие, а затем выходит из неё и основную часть маршрута движется уже вне дисперсной структуры. Поэтому эрозионная и тепловая цена

связана не со всем межпланетным перелётом, а с ограниченным участком прохождения. Полезный же результат может продолжаться накапливаться после выхода, поскольку аппарат сохраняет полученное изменение скорости, направления или режима движения.

В этом состоит центральная логика главы: структура даёт краткое локальное воздействие, а результат этого воздействия развивается на последующем баллистическом участке.

Прямой импульсный вклад

Первый механизм — прямой импульсный вклад дисперсной среды. При прохождении через направленную разреженную среду аппарат, защитно-стабилизирующий модуль или разгонно-направляющий блок взаимодействует с потоком частиц. Это взаимодействие создаёт интегральный импульс, который может изменить скорость аппарата или его вынесенного рабочего элемента.

В самом общем виде прямой вклад можно выразить как:

$$\Delta_{\text{dust}} = J_{\text{dust}} / M_{\text{app}}$$

где J_{dust} (dust impulse) — суммарный импульс, полученный от среды, а M_{app} (spacecraft mass) — масса аппарата или связки аппарат + рабочий модуль.

В предыдущих главах было показано, что этот вклад зависит от плотности среды, эффективной площади взаимодействия, относительной скорости, длины участка и коэффициента эффективности передачи импульса. Поэтому его можно качественно представить как результат взаимодействия пяти факторов:

- плотность среды;
- длина участка;
- эффективная площадь аппарата;
- относительная скорость;
- режим передачи импульса.

Для первого ограниченного сценария прямой Δ_{dust} не должен завышаться. Он, вероятно, будет меньше полной цены межпланетного перехода и не заменит двигатель. Однако это не делает его бесполезным. Его нужно сравнивать не с полной скоростью аппарата и не со всем межпланетным Δv а с той частью цены, которую аппарат должен был бы платить собственным запасом топлива: дополнительным импульсом быстрого режима, коррекциями, стабилизацией или торможением у цели.

Если в главе 23 условная дополнительная цена быстрого режима была задана как 400 м/с, то даже компенсация 40–80 м/с уже соответствует 10–20 % этой дополнительной цены. Для аппарата массой 1000 кг и эффективной скорости истечения 3000 м/с это даёт эквивалент 13–27 кг топлива. При компенсации 120–200 м/с эффект возрастает до 40–67 кг.

Эти величины не следует понимать как доказанный расчёт готовой миссии. Они показывают масштаб: даже умеренный прямой или суммарный вклад структуры может стать заметным, если он применяется к повторяемому высокоэнергетическому режиму и серии аппаратов.

Оценка прямого импульсного вклада Δv_{dust} для первого расчётного сценария

Ниже используются обозначения, введенные и расшифрованные в предыдущих главах. Настоящий раздел не вводит новых физических параметров, а применяет ранее определённые величины для получения количественной оценки прямого импульсного взаимодействия аппарата с дисперсной средой. При этом необходимо отдельно оценить прямой импульсный вклад структуры в изменение скорости аппарата. Если интегральный импульс, переданный аппарату при прохождении участка, равен:

$$J_{\text{dust}} \sim C_{\text{eff}} * \rho_{\text{dust}} * A_{\text{eff}} * v_{\text{rel,a}} * L$$

то для аппарата массой M_a соответствующее изменение скорости составляет:

$$\Delta v_{\text{dust}} \sim J_{\text{dust}} / M_a$$

Для первого ограниченного расчётного сценария примем:

$$\rho_{\text{dust}} = 10^{-13} - 10^{-12} \text{ кг/м}^3$$

$$A_{\text{eff}} = 100 \text{ м}^2$$

$$v_{\text{rel,a}} = 10^4 \text{ м/с}$$

$$L = 10^9 \text{ м}$$

$$M_a = 1000 \text{ кг}$$

$$C_{\text{eff}} \sim 1$$

Тогда:

$$J_{\text{dust}} \sim 100 - 1000 \text{ Н*с}$$

и:

$$\Delta v_{\text{dust}} \sim 0,1 - 1 \text{ м/с}$$

Эта оценка показывает, что в первом ограниченном сценарии прямой импульсный вклад структуры относится к диапазону слабого распределённого воздействия. Он не является основным источником межпланетного Δv и не должен сравниваться с двигательной установкой как её замена. Двигатель создаёт основной энергетический вклад аппарата; дисперсная структура создаёт заранее подготовленную среду прохождения, в которой меняются условия движения, допустимый коридор входа, чувствительность к малым отклонениям, режим стабилизации и повторяемость прохождения участка.

Поэтому Δv_{dust} в настоящей работе является не главным показателем эффективности структуры, а нижней физической оценкой прямого импульсного взаимодействия со средой. Полезное действие структуры должно оцениваться шире: через снижение части коррекционной цены, расширение допустимого окна входа, стабилизацию режима прохождения, повышение повторяемости движения, возможность использования одного подготовленного участка серией аппаратов и последующее баллистическое накопление результата после выхода из участка.

Для участка длиной:

$$L = 1\,000\,000 \text{ км} = 10^9 \text{ м}$$

и относительной скорости:

$$v_{\text{rel,a}} = 10\,000 \text{ м/с}$$

время прохождения составляет:

$$T_{\text{pass}} = 10^9 / 10^4 = 10^5 \text{ с}$$

или примерно:

$$T_{\text{pass}} \sim 27,8 \text{ ч}$$

При силе:

$$F_{\text{dust}} \sim 10^{-4} - 10^{-2} \text{ Н}$$

полный переданный импульс составляет:

$$J_{\text{dust}} \sim 10 - 1\,000 \text{ Н*с}$$

Изменение скорости аппарата массой M_{app} :

$$\Delta v_{\text{dust}} = J_{\text{dust}} / M_{\text{app}}$$

или:

$$\Delta v_{\text{dust}} \sim C_{\text{eff}} * \rho_{\text{dust}} * A_{\text{eff}} * v_{\text{rel,a}} * L / M_{\text{app}}$$

Для аппарата массой:

$$M_{\text{app}} = 1\,000 \text{ кг}$$

получаем:

$$\Delta v_{\text{dust}} \sim 0,01 - 1 \text{ м/с}$$

Это значение не следует сравнивать с полным межпланетным Δv , необходимым для перелёта между планетами. Оно относится к направляющему, корректирующему и демпфирующему режиму. В этом режиме структура участвует не в замене двигателя, а в снижении чувствительности к малым отклонениям, в формировании повторяемого коридора движения и в переносе части коррекционных требований с аппарата на заранее подготовленную среду.

Именно поэтому Δv_{dust} является не единственным и не исчерпывающим показателем пользы структуры. Его необходимо рассматривать совместно с направлением действия импульса, ошибкой входа аппарата в коридор, допустимым отклонением траектории, требованиями к стабилизации и эрозионной ценой получения этого импульса.

Для проверки порядка величин необходимо связать рабочую плотность среды с физическим выходным параметром. В простейшем приближении массовый поток дисперсного вещества через эффективную площадь аппарата можно записать как:

$$\dot{m}_{\text{dust}} = \rho_{\text{dust}} * A_{\text{eff}} * v_{\text{rel,a}}$$

где:

$\dot{m}_{\text{dust}}$ (dust mass flow rate) — масса частиц, проходящая через эффективную площадь аппарата за единицу времени;

Эта формула нужна для перехода от плотности среды к измеримому воздействию на аппарат. Она показывает, что даже при одной и той же плотности результат зависит от площади взаимодействия и относительной скорости. Поэтому рабочая плотность структуры сама по себе не определяет полезный эффект: её необходимо рассматривать совместно с A_{eff} и $v_{\text{rel,a}}$.

Для нижнего рабочего режима можно принять:

$$\rho_{\text{dust}} = 10^{-13} \text{ кг/м}^3$$

$$A_{\text{eff}} = 100 \text{ м}^2$$

$$v_{\text{rel,a}} = 10\,000 \text{ м/с}$$

Тогда:

$$\dot{m}_{\text{dust}} = 10^{-13} * 100 * 10^4$$

$$\dot{m}_{\text{dust}} = 10^{-7} \text{ кг/с}$$

Если аппарат проходит участок длиной:

$$L = 10^9 \text{ м}$$

при относительной скорости:

$$v_{\text{rel,a}} = 10\,000 \text{ м/с}$$

то время прохождения составляет:

$$T_{\text{pass}} = L / v_{\text{rel,a}}$$

$$T_{\text{pass}} = 10^9 / 10^4 = 10^5 \text{ с}$$

то есть около:

$$27,8 \text{ ч}$$

За это время через эффективную площадь аппарата проходит масса:

$$m_{\text{dust}} = \dot{m}_{\text{dust}} * T_{\text{pass}}$$

$$m_{\text{dust}} = 10^{-7} * 10^5 = 10^{-2} \text{ кг}$$

то есть около:

$$10 \text{ г}$$

При верхней границе оптимального режима:

$$\rho_{\text{dust}} = 2 * 10^{-13} \text{ кг/м}^3$$

эта величина возрастает примерно до:

$$20 \text{ г}$$

Следовательно, в первом минимальном режиме прямое взаимодействие не должно рассматриваться как полноценная замена двигателю. Его значение состоит в слабом, протяжённом и повторяемом воздействии, которое может участвовать в коррекции, демпфировании, стабилизации и расширении допустимого окна входа.

Оценочно силовое воздействие можно записать через поток импульса:

$$F_{\text{dust}} \sim C_p * \dot{m}_{\text{dust}} * v_{\text{rel,a}}$$

где C_p (effective momentum transfer coefficient) — эффективный коэффициент передачи импульса, учитывающий геометрию поверхности, угол столкновения, отражение, разрушение частиц и материал защитной поверхности.

При $C_p \sim 1$:

$$F_{\text{dust}} \sim 10^{-7} * 10^4 = 10^{-3} \text{ Н}$$

Для аппарата массой:

$$M_{\text{app}} = 1000 \text{ кг}$$

ускорение составляет:

$$a_{\text{dust}} = F_{\text{dust}} / M_{\text{app}}$$

$$a_{\text{dust}} = 10^{-3} / 1000 = 10^{-6} \text{ м/с}^2$$

За время прохождения:

$$T_{\text{pass}} = 10^5 \text{ с}$$

изменение скорости порядка:

$$\Delta v_{\text{dust}} \sim a_{\text{dust}} * T_{\text{pass}}$$

$$\Delta v_{\text{dust}} \sim 10^{-6} * 10^5 = 0,1 \text{ м/с}$$

где a_{dust} (acceleration due to dust interaction) — ускорение аппарата, возникающее вследствие передачи импульса от частиц дисперсной среды.

Эта величина мала по сравнению с ракетным манёвром, но не равна нулю. Её значение состоит не столько в самом импульсе, сколько в появлении управляемой среды движения там, где обычно находится практически вакуум. В этом смысле структура представляет собой попытку перенести часть преимуществ аэродинамического режима в межпланетное пространство: использовать взаимодействие аппарата со средой для управления движением, сохраняя при этом существенно меньшие потери, нагрузки и ограничения, чем при полёте в атмосфере.

Следует также отметить, что приведённый расчёт использует непрерывное представление дисперсной среды через её массовую плотность. Однако тот же результат может быть получен и более наглядным способом. В этом случае сначала задаётся масса отдельной частицы выбранной фракции. Затем по известной массовой плотности среды оценивается количество таких частиц в единице объёма. После этого определяется объём среды, который пересекает аппарат за время прохождения участка, и рассчитывается общее число частиц, взаимодействующих с аппаратом. Зная массу одной частицы и общее число столкновений, можно независимо оценить суммарную массу взаимодействующего вещества, переданный импульс, тепловую нагрузку и другие параметры прохождения.

В настоящей работе для первого расчётного сценария используется плотностное представление как более компактное. Однако оба подхода описывают один и тот же физический процесс и при одинаковых исходных параметрах должны приводить к сопоставимым оценкам порядка величин.

В укрупнённой оценке:

$$h_{\text{erosion}} \sim Y_{\text{eros}} * \rho_{\text{dust}} * L / \rho_{\text{shield}}$$

где:

Y_{eros} (effective erosion coefficient) — укрупнённый эффективный коэффициент эрозии;

ρ_{dust} (dust density) — массовая плотность дисперсной среды;

L (interaction length) — длина участка взаимодействия;

ρ_{shield} (shield material density) — плотность материала защитного слоя;

h_{erosion} (erosion depth) — расчётная глубина эрозионного износа за один проход.

Коэффициент Y_{eros} используется не как универсальная физическая константа, а как параметр сценария, сворачивающий в одну величину влияние формы частиц, угла столкновения, материала защитной поверхности и режима контакта. Поскольку для выбранной фракции 50–70 мкм надёжные экспериментальные данные отсутствуют, в работе рассматривается широкий диапазон значений Y_{eros} от 10 до 1000, позволяющий оценить чувствительность результата к неопределённости параметров взаимодействия.

Для ориентировочной оценки примем плотность металлического защитного слоя:

$$\rho_{\text{shield}} \sim 7\,800 \text{ кг/м}^3$$

Тогда при:

$$\rho_{\text{dust}} = 10^{-13} - 10^{-12} \text{ кг/м}^3$$

$$L = 10^9 \text{ м}$$

получаем:

$$\rho_{\text{dust}} \cdot L = 10^{-4} - 10^{-3} \text{ кг/м}^2$$

и:

$$\rho_{\text{dust}} \cdot L / \rho_{\text{shield}} \sim 1,3 \cdot 10^{-8} - 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

или:

$$\rho_{\text{dust}} \cdot L / \rho_{\text{shield}} \sim 0,013 - 0,13 \text{ мкм}$$

С учётом коэффициента Y_{eros} :

при $Y_{\text{eros}} = 10$:

$$h_{\text{erosion}} \sim 0,13 - 1,3 \text{ мкм}$$

при $Y_{\text{eros}} = 100$:

$$h_{\text{erosion}} \sim 1,3 - 13 \text{ мкм}$$

при $Y_{\text{eros}} = 1000$:

$$h_{\text{erosion}} \sim 13 - 130 \text{ мкм}$$

Такой диапазон уже требует значительного запаса и осторожной проверки, но он всё равно относится к расходу защитного слоя, а не к автоматическому разрушению аппарата. Поэтому ключевой инженерный вывод состоит в том, что эрозионная цена первого режима может быть вынесена на специально рассчитанную защитную поверхность.

Рабочее условие допустимости можно записать как:

$$h_{\text{erosion}} \leq h_{\text{allow}}$$

где:

h_{allow} — допустимый расход защитного слоя за один проход или за заданное число проходов.

В развёрнутом виде:

$$Y_{\text{eros}} \cdot \rho_{\text{dust}} \cdot L / \rho_{\text{shield}} \leq h_{\text{allow}}$$

Эта запись удобна тем, что она сразу показывает способы управления режимом. Если требуется снизить эрозию, можно уменьшить плотность среды ρ_{dust} , сократить длину активного взаимодействия L , выбрать более устойчивый защитный материал, снизить эффективный коэффициент Y_{eros} за счёт формы частиц и поверхности или вынести взаимодействие на заменяемый элемент.

Например, если защитный слой имеет толщину:

$$h_{\text{shield}} = 1 \text{ мм} = 1000 \text{ мкм}$$

то потеря:

$$h_{\text{erosion}} = 1 - 10 \text{ мкм}$$

составляет:

$$0,1 - 1\%$$

толщины слоя.

Даже потеря:

$$h_{\text{erosion}} = 100 \text{ мкм}$$

соответствует:

10%

миллиметрового защитного слоя.

где:

- h_{shield} (shield thickness) — толщина защитного слоя или защитной поверхности, предназначенной для восприятия эрозионного износа.
- h_{erosion} (erosion depth) — расчётная глубина эрозионного износа защитного слоя за один проход или заданный цикл эксплуатации.

Это не означает, что такой режим автоматически является оптимальным. Но это показывает, что при правильной компоновке речь может идти не о разрушении корпуса, а о расчётном расходе защитной поверхности. Следовательно, эрозия становится не запретом на использование структуры, а одним из проектных параметров.

Оценка стабилизирующего момента для первого расчётного сценария

Если сила взаимодействия аппарата с дисперсной средой приложена не через центр масс, возникает внешний момент:

$$M_{\text{stab}} \sim F_{\text{dust}} * l_{\text{eff}}$$

где:

- F_{dust} (dust interaction force) — сила взаимодействия аппарата с дисперсной средой;
- l_{eff} (effective lever arm) — эффективное плечо приложения силы относительно центра масс аппарата;
- M_{stab} (stabilizing moment) — оценочный стабилизирующий момент, возникающий вследствие взаимодействия аппарата с дисперсной средой.

Для диапазона:

$$F_{\text{dust}} = 10^{-4} - 10^{-2} \text{ Н}$$

и:

$$l_{\text{eff}} = 5 - 20 \text{ м}$$

получаем:

$$M_{\text{stab}} \sim 5 * 10^{-4} - 2 * 10^{-1} \text{ Н·м}$$

Базовое значение при:

$$F_{\text{dust}} = 10^{-3} \text{ Н}$$

и:

$$l_{\text{eff}} = 5 \text{ м}$$

составляет:

$$M_{\text{stab}} \sim 5 * 10^{-3} \text{ Н·м}$$

Полученные значения не означают автоматическую стабилизацию аппарата и зависят от конкретной компоновки, распределения масс и характеристик системы

управления. Однако они показывают, что даже в нижнем рабочем режиме дисперсная среда способна создавать не только линейный импульс, но и внешний механический момент. Следовательно, взаимодействие со структурой может влиять не только на траекторию аппарата, но и на его ориентацию, что требует отдельного учёта при проектировании защитно-стабилизирующего модуля.

Почему прямой импульс не является единственным эффектом

Если бы дисперсная структура давала только прямой импульс, её полезность была бы ограничена. Но в предлагаемой постановке она должна рассматриваться шире. Среда может давать не только Δv_{dust} , но и уменьшать другие статьи затрат аппарата.

Обычный аппарат в высокоэнергетическом режиме должен самостоятельно решать несколько задач: выйти на нужную траекторию, удерживать направление, исправить начальные ошибки, выполнить коррекции, стабилизировать ориентацию, погасить часть относительной скорости при прибытии и сохранить запас рабочего тела на непредвиденные отклонения. Если часть этих задач переносится на подготовленную среду, выигрыш становится больше, чем простой прямой импульс.

Поэтому полезный эффект первого участка нужно понимать как сумму нескольких вкладов:

- прямой импульсный вклад;
- снижение коррекционной цены;
- снижение стабилизационной цены;
- расширение окна входа;
- тормозно-входная функция у цели;
- повышение повторяемости прохождения;
- баллистическое накопление результата после выхода.

Именно эта совокупность переводит дисперсный участок из категории “слабое локальное воздействие” в категорию инфраструктурного элемента.

Иными словами, прямой Δv_{dust} показывает только нижний физический слой взаимодействия аппарата со средой. Инфраструктурный смысл структуры возникает на следующем уровне: когда это слабое локальное воздействие меняет условия входа, прохождения, стабилизации, коррекции и последующего баллистического движения. Поэтому первый участок следует оценивать не как источник одного большого импульса, а как искусственно созданную среду, в которой аппарат получает набор малых, но согласованных преимуществ, способных суммироваться в практический выигрыш на траектории и на серии аппаратов.

Снижение коррекционной цены

Второй механизм — снижение коррекционной цены. В межпланетном полёте небольшая ошибка скорости или направления на раннем этапе может дать большое смещение на дальнем участке траектории. Поэтому аппарат должен иметь запас коррекций, даже если основной разгон уже выполнен.

Если без структуры аппарат должен самостоятельно исправлять поперечное отклонение, ошибку входа или ошибку ориентации, то он расходует рабочее тело. Если же часть этой коррекции создаётся или облегчается внешней средой, то бортовой запас уменьшается.

Такой выигрыш не всегда выглядит как большой прямой Δv . Иногда он выражается иначе: аппарату требуется меньше микрокоррекций, меньше запас на ошибку, меньше активная стабилизация, ниже требования к точности входа. В сумме это может давать практический выигрыш, сопоставимый с прямой экономией топлива.

В главе 23 для первого примера использовалась условная дополнительная цена быстрого режима 400 м/с. Если структура снижает только 10–20 % этой цены, аппарат получает эквивалент 13–27 кг топлива. Если снижение достигает 30–50 %, эквивалент становится 40–67 кг. В реальной миссии часть этой массы может уйти на защитно-стабилизирующий модуль, но это не отменяет результата: масса перераспределяется с топлива на элементы, обеспечивающие новый режим движения.

Коррекционный выигрыш особенно важен для серии аппаратов. Один аппарат может выиграть десятки килограммов эквивалентной массы. Серия из 100 аппаратов превращает этот выигрыш в тонны: от 1,3–2,7 т в устойчивом варианте до 4,0–6,7 т в эффективном. Поэтому даже умеренное снижение коррекционной цены имеет инфраструктурный смысл.

Расширение окна входа

Третий механизм — расширение допустимого окна входа. В обычной высокоэнергетической траектории аппарат должен попасть в расчётный коридор с высокой точностью. Чем быстрее режим, тем выше цена начальной ошибки: малая ошибка в начале может привести к существенному отклонению на дальнем участке.

Дисперсная структура может работать как подготовленный рабочий коридор. Она не отменяет навигацию, но может снижать чувствительность к малым ошибкам входа. Для этого структура должна иметь достаточный поперечный размер, входную зону с мягким градиентом плотности и рабочую область, в которой параметры взаимодействия остаются допустимыми.

В предыдущей главе и в главе о минимальном участке было принято первое расчётное значение рабочего радиуса порядка 10 км, то есть рабочего диаметра порядка 20 км. Это значение не является окончательным оптимумом. Оно задаёт масштаб первого приближения. Реальный радиус должен уточняться под класс аппаратов, навигационную точность, запас безопасности, допустимый градиент плотности и массу структуры.

Смысл этого параметра состоит не в том, чтобы объявить 20 км универсальной шириной для всех аппаратов. Смысл в том, что структура должна быть достаточно широкой, чтобы не превращаться в узкую мишень. Если аппарат должен попадать в метровую или сотнеметровую область на межпланетной траектории, основная нагрузка снова переносится на навигацию и активные коррекции. Тогда структура теряет часть инфраструктурного смысла.

Если же рабочий коридор расширяет допустимое окно входа хотя бы в 2–5 раз, это уже существенно снижает требования к навигации и запасу коррекций. Если расширение достигает 5–10 раз, участок становится не просто областью взаимодействия, а настоящей направляющей средой для аппаратов сходного класса.

Такой выигрыш трудно полностью выразить в килограммах топлива. Его значение проявляется в снижении риска, уменьшении требований к точности, упрощении повторного прохождения и возможности использовать один и тот же участок серией аппаратов.

Внешняя стабилизация

Четвёртый механизм — внешняя стабилизация. В обычном полёте ориентация аппарата поддерживается бортовыми системами: маховиками, двигателями ориентации, реактивными микродвигателями или иными средствами. В высокоэнергетическом режиме и при прохождении критических участков требования к стабилизации возрастают.

Если аппарат снабжён защитно-стабилизирующим модулем, вынесенной поверхностью, экраном, внешним баком, плитой или другим рабочим элементом, поток частиц может создавать не только дополнительную нагрузку, но и внешний механический момент. Как было показано выше, даже в нижнем рабочем режиме такие моменты могут достигать величин, требующих учёта при проектировании аппарата и его системы управления. Их конкретное значение зависит от формы аппарата, расположения центра масс, эффективной площади взаимодействия и геометрии защитно-стабилизирующего модуля.

Это не означает, что среда автоматически стабилизирует любой аппарат. Напротив, аппарат должен быть рассчитан под такое взаимодействие. Если форма и компоновка не согласованы со средой, поток частиц может создать нежелательные моменты, эрозию или вращение. Поэтому речь идёт не о пассивном преимуществе для любого объекта, а о связанной системе: структура — защитно-стабилизирующий модуль — аппарат.

В первом сценарии это особенно важно. Структура не обязана давать большой прямой разгон. Её более реалистичная функция на раннем этапе — сделать прохождение высокоэнергетического режима устойчивее: уменьшить поперечные отклонения, стабилизировать вход, снизить требования к активной ориентации и уменьшить число последующих коррекций.

Тормозно-входная функция у цели

Пятый механизм — тормозно-входная функция у цели. В главе 25 было показано, что пример Dawn важен не только как показатель длительности перелёта к Весте, но и как пример миссии, где существенную роль играли сближение, торможение и постепенный переход к орбитальным операциям.

Если у цели существует подготовленный дисперсный участок, он может работать в обратном режиме по отношению к разгонно-направляющему участку. При вылете структура помогает аппарату выйти на более энергичную траекторию. При прибытии она может помогать уменьшить относительную скорость, расширить окно входа, снизить часть тормозной цены и облегчить переход к целевому режиму.

Такой участок не обязан полностью захватывать аппарат на орбиту. Это было бы чрезмерным требованием для первого сценария. Достаточно, чтобы он уменьшал часть тормозного импульса, снижал коррекционную нагрузку и сокращал длительность сближения.

При этом тормозно-входной участок не обязан иметь те же параметры, что и разгонно-направляющий участок. Для него может быть выбрана более диссипативная фракция: частицы с большей склонностью к деформации, разрушению, скольжению или частичному рассеянию энергии при контакте с защитной поверхностью. В таком режиме часть кинетической энергии взаимодействия расходуется не на жёсткое абразивное воздействие на экран, а на внутреннее разрушение или деформацию частиц, изменение их траектории и распределённое торможение.

Поэтому повышенная тормозная функция не обязательно означает пропорционально большую эрозионную цену. При правильно выбранной

морфологии частиц, материале защитного слоя, угле входа и геометрии рабочей поверхности тормозной участок может создавать более выраженный диссипативный эффект при приемлемом износе защитного элемента. Иными словами, тормозный режим должен проектироваться не как более плотная версия разгонного участка, а как отдельная функциональная зона с собственным составом, фракцией, плотностью и допустимым режимом контакта.

Если использовать тот же демонстрационный порядок, что и в главе 23, то компенсация 10–20 % тормозно-сближающей цены даёт эквивалент 13–27 кг топлива для аппарата массой 1000 кг. Компенсация 30–50 % даёт 40–67 кг. На серии аппаратов это снова превращается в тонны эквивалентной массы.

Но главное здесь не только топливо. Если тормозно-входной участок сокращает длительный этап сближения хотя бы на 10–20 %, выигрыш может выражаться неделями. При более сильной компенсации он может выражаться месяцами. Для миссий к объектам главного пояса это уже практически значимый результат.

Защита, эрозионная цена и перераспределение массы

Шестой механизм связан не с выигрышем, а с ценой выигрыша. Прохождение через дисперсную среду создаёт эрозионную и тепловую нагрузку. Поэтому аппарат не может рассматриваться как обычное тело, случайно пролетающее через пылевую область. Он должен иметь защитно-стабилизирующий модуль или иную рабочую поверхность, рассчитанную на взаимодействие с частицами.

Это сразу создаёт важный вопрос: не съест ли масса защиты весь выигрыш по топливу?

Ответ должен быть аккуратным. Да, часть экономии может быть израсходована на защиту. Если в эффективном варианте один аппарат получает эквивалент 40–67 кг топлива, а защитно-стабилизирующий модуль требует сопоставимой массы, чистый выигрыш полезной нагрузки может оказаться небольшим или даже отсутствовать для одного аппарата. Но это не означает, что структура бесполезна. Во-первых, защита является не посторонним балластом, а элементом допуска к новому режиму движения. Она позволяет аппарату использовать среду, получать стабилизацию, снижать коррекции и проходить через подготовленный участок.

Кроме того, защитно-стабилизирующий модуль не обязательно должен оставаться частью аппарата на протяжении всей миссии. В зависимости от архитектуры он может использоваться только на участке взаимодействия со структурой и затем отделяться после завершения разгонного или тормозно-входного режима. В этом случае часть дополнительной массы не переносится на последующие этапы полёта и не участвует в дальнейшем разгоне, коррекциях или манёврах у цели.

Следовательно, сравнение массы защиты и массы сэкономленного топлива не всегда должно выполняться напрямую. Даже если модуль имеет значительную массу, после завершения рабочего участка он может быть сброшен, тогда как выигрыш по скорости, коррекционной цене или траектории сохраняется и продолжает влиять на последующий полёт.

При этом сам защитно-стабилизирующий модуль может иметь различную физическую реализацию. В простейшем варианте это эрозионно-стойкая поверхность или экран. В более сложных вариантах он может включать элементы управления взаимодействием со средой: электростатические, магнитные или иные системы, если свойства рабочей фракции допускают соответствующий режим воздействия. Поэтому такой модуль следует рассматривать не только как защиту, но как специализированный интерфейс между аппаратом и дисперсной структурой.

Во-вторых, масса защиты может быть общей для класса аппаратов или разгонно-направляющих блоков. Если через участок проходит серия аппаратов сходной компоновки, конструкция защиты стандартизируется, а её масса становится частью архитектуры, а не разовым экспериментальным штрафом.

В-третьих, экономия не сводится к топливу. Даже если часть массы уходит на защиту, аппарат может выиграть во времени, устойчивости, допустимом окне входа, снижении риска и уменьшении требований к коррекциям.

В-четвёртых, защитно-стабилизирующий модуль может быть не только защитой, но и рабочим элементом: он принимает нагрузку, передаёт импульс, создаёт стабилизирующий момент и локализует эрозию в заменяемой или специально рассчитанной детали.

Поэтому корректный вывод такой: масса защиты уменьшает чистый выигрыш полезной нагрузки, но не отменяет инфраструктурный смысл участка. Она должна учитываться как часть баланса, а не как аргумент против самой постановки.

Баллистическое накопление результата

Седьмой механизм — баллистическое накопление результата после выхода из структуры. Это один из наиболее важных эффектов, поскольку он объясняет, почему ограниченное локальное воздействие может иметь дальнейшее последствие.

Аппарат проходит через структуру только на ограниченном участке. На этом участке он получает небольшое изменение скорости, направления или поперечного компонента движения. После выхода из структуры взаимодействие с частицами прекращается, но полученное изменение сохраняется. Далее аппарат движется по новой баллистической или слабокорректируемой траектории.

Если после выхода существует длинный свободный участок, даже малая поперечная коррекция может дать значительное смещение. Например, при последующем свободном движении на расстояние порядка 1 а.е. малая поперечная скорость 0,01 м/с может дать смещение порядка десятков километров. При 0,1 м/с эффект становится порядка сотен километров, а при 1 м/с — тысяч километров.

Это не означает, что всякое смещение полезно. Оно должно быть направленным и заранее учтённым в траекторной схеме. Но сам принцип важен: структура может дать короткое воздействие, а полезный результат проявится на большем расстоянии.

Именно поэтому ранее неоднократно подчёркивалось, что аппарат не летит внутри структуры весь путь. Он проходит через ограниченный рабочий участок, получает нужную поправку, затем выходит из дисперсной среды и дальше накапливает результат уже без дальнейшей эрозионной нагрузки.

Повторяемость и серия аппаратов

Восьмой механизм — повторяемость. Обычный одиночный аппарат несёт на себе почти всю миссионную сложность: разгон, коррекции, торможение, стабилизацию, запас топлива и запас на ошибки. Инфраструктурная схема переносит часть этой сложности на обслуживаемую среду.

Если участок используется один раз, его оправдать труднее. Если он используется десятки или сотни раз, логика меняется. Один и тот же участок может помогать аппаратам сходного класса проходить через одинаковый режим, использовать похожее окно входа, получать сходный стабилизирующий эффект и снижать часть коррекционной цены.

В главе 25 была использована серия из 100 аппаратов. При экономии 13–27 кг на один аппарат суммарный эквивалент составляет 1,3–2,7 т. При экономии 40–67 кг — 4,0–6,7 т. Это уже не локальная поправка, а инфраструктурный масштаб.

При этом серия важна не только из-за массы. Она даёт повторяемость траекторий, стандартизацию защитных модулей, накопление статистики прохождений, уточнение параметров среды, снижение неопределённости и возможность обслуживать участок по фактическим данным.

Именно серия превращает первый участок из экспериментальной зоны в транспортный элемент. Чем больше аппаратов используют участок, тем сильнее оправдываются затраты на его формирование, диагностику и обслуживание.

Совместимость с другими средствами движения

Девятый механизм — совместимость с другими средствами движения. Дисперсная структура не должна противопоставляться двигателям, гравитационным манёврам, электрореактивной тяге, солнечным парусам или классической баллистике. Она не отменяет эти методы, а добавляет ещё один инфраструктурный слой.

Гравитационный манёвр может изменить энергию и направление движения за счёт пролёта около массивного тела. Электрореактивная тяга может долго и экономично изменять орбиту. Химический двигатель может дать быстрый импульс. Дисперсная структура может снизить цену входа, выхода, коррекций, стабилизации или торможения в заранее подготовленной зоне.

Совокупное применение таких средств может дать больший результат, чем каждое из них отдельно. Например, аппарат может использовать двигатель для первичного выхода, гравитационный манёвр для крупного изменения энергии, а дисперсный участок — для стабилизации, коррекции, входа в целевой режим или уменьшения тормозной цены. В такой схеме структура становится не заменой существующих методов, а дополнительным элементом миссионной архитектуры.

Особенно интересным может оказаться сочетание дисперсной структуры с гравитационными манёврами. Во многих межпланетных миссиях именно выход на высокоскоростную траекторию, необходимую для эффективного использования гравитационного манёвра, требует значительных затрат импульса и поэтому применяется ограниченно. В результате потенциально выгодные режимы пролёта около массивных тел используются реже, чем это допускает небесная механика.

Если дисперсная структура способна снизить часть цены такого выхода, она может изменить не сам механизм гравитационного манёвра, а условия его практического применения. В этом случае аппарат получает возможность чаще использовать более энергичные траектории, раньше достигать области гравитационного воздействия крупного тела и эффективнее использовать уже существующие динамические возможности Солнечной системы.

Поэтому структура может рассматриваться не только как самостоятельный инфраструктурный элемент, но и как средство расширения области применимости других методов движения. В ряде сценариев её основная ценность может состоять именно в том, что она делает более доступными режимы, которые без дополнительной инфраструктурной поддержки оказываются слишком дорогими по времени, топливу или требованиям к аппарату.

Это особенно важно для практической части работы. Первый участок не обязан сразу доказывать превосходство над всеми существующими способами движения. Достаточно показать, что он может снижать цену выбранного режима и быть совместимым с другими средствами межпланетной навигации.

Сводная оценка механизмов

Механизмы выигрыша можно свести в одну практическую схему.

- Прямой импульсный вклад даёт аппарату малое изменение скорости или направления.
- Коррекционный вклад снижает расход рабочего тела на исправление ошибок.
- Входной вклад расширяет допустимое окно попадания в рабочий коридор.
- Стабилизационный вклад уменьшает требования к активной ориентации и удержанию режима.
- Тормозно-входной вклад снижает цену прибытия к цели.
- Защитно-стабилизирующий модуль превращает эрозионную цену в управляемый элемент конструкции.
- Баллистическое накопление позволяет малой локальной поправке проявляться на большом последующем участке.
- Серия аппаратов превращает умеренный эффект одного прохода в инфраструктурный результат.
- Совместимость с двигателями и гравитационными манёврами позволяет включать структуру в сложные миссионные архитектуры.

Эта схема показывает, что первый участок не должен оцениваться по одной величине Δv_{dust} . Прямой импульсный вклад является лишь наиболее очевидным и проще всего измеряемым эффектом. Однако сама идея структуры состоит не в создании локального аналога двигателя, а в формировании управляемой среды движения на заранее подготовленном участке траектории.

В такой постановке аппарат получает не один источник выигрыша, а целый набор связанных преимуществ: уменьшается цена коррекций и стабилизации, расширяется допустимое окно входа, снижается часть тормозной нагрузки у цели, появляется возможность использовать специальные защитно-стабилизирующие модули, а малые локальные воздействия продолжают проявляться на последующем баллистическом участке. Дополнительный эффект возникает за счёт совместимости структуры с двигателями, гравитационными манёврами и другими средствами движения.

Поэтому практический смысл первого участка определяется не величиной отдельного эффекта, а их совместным действием. Структура не заменяет двигатель, гравитационный манёвр или систему управления полётом. Она создаёт дополнительный инфраструктурный слой, который меняет условия движения аппарата на выбранном участке траектории. Именно эта совокупность эффектов и должна рассматриваться как основной объект проверки в первом расчётном сценарии.

Ограничения настоящей оценки

Настоящая глава не доказывает готовую эксплуатационную эффективность структуры. Для этого необходимы точные траекторные модели, выбор конкретного аппарата, расчёт защитно-стабилизирующего модуля, моделирование прохождения через дисперсную среду, оценка эрозии, тепловой нагрузки, фазового разброса частиц и деградации участка.

Также необходимо отдельно оценить массу защиты. Нельзя автоматически считать всю экономию топлива чистым увеличением полезной нагрузки. Для одного

аппарата защитный модуль может занять значительную часть выигрыша. Поэтому правильная оценка должна сравнивать не только “топливо до” и “топливо после”, а полный баланс: топливо, защита, полезная нагрузка, рабочее тело, риск, время, повторяемость и ресурс.

Тем не менее уже на уровне первого расчётного сценария можно сделать важный вывод. Структура имеет смысл не как одиночный способ разгона, а как многофункциональный участок, который снижает цену выбранного режима движения. Её практическая проверка должна быть направлена не только на измерение прямого импульса, но и на проверку входного окна, стабилизации, коррекционного эффекта, тормозной функции и повторяемости прохождения.

Итог главы

Главный результат настоящей главы состоит в том, что прямой импульсный вклад Δv_{dust} отделён от совокупного инфраструктурного эффекта. Расчёт показывает, что в первом ограниченном сценарии прямое воздействие дисперсной среды находится в диапазоне слабого распределённого воздействия и не может рассматриваться как замена двигательной установке.

Однако именно это уточнение делает постановку более устойчивой. Полезность структуры должна оцениваться не только по прямому изменению скорости, а по совокупности эффектов: снижению коррекционной цены, расширению окна входа, внешней стабилизации, тормозно-входной функции у цели, управляемой эрозионной цене, повторяемости прохождения и баллистическому накоплению результата после выхода из участка.

Следовательно, первый участок является не «пылевым двигателем», а скорее пылевой дорогой — искусственно созданной средой движения в космическом пространстве. Его задача состоит не в замене двигателя, а в переносе части преимуществ аэродинамического режима в область межпланетного полёта. Аппарат получает возможность взаимодействовать не с практически пустым пространством, а с подготовленной средой, которая может участвовать в стабилизации, коррекции, торможении, расширении окна входа и формировании повторяемых траекторий. В сочетании с защитно-стабилизирующими модулями, баллистическим накоплением результата, гравитационными манёврами и другими средствами движения такая среда становится самостоятельным инфраструктурным элементом миссии, а не только источником дополнительного импульса.

27. Орбитально-геометрическая постановка первого участка

Первый расчётный участок в настоящей практической части должен задаваться не только массой, длиной и плотностью, но и примерной орбитально-геометрической постановкой. Без этого дальнейшие расчёты высвобождения и сроков формирования остаются неполными: структура является орбитально-ориентированной, а значит её рабочие параметры зависят от области размещения, плоскости, наклона, фазового положения и направления выхода аппаратов.

В качестве первого практического сценария принимается область внутренней части главного пояса астероидов, ориентировочно:

$$r_{\text{struct}} \sim 2,3\text{--}2,5 \text{ a.e.}$$

где r_{struct} (structure heliocentric distance) — гелиоцентрическое расстояние области размещения структуры

Эта область выбрана как расчётный пример, а не как единственно возможное место размещения. Она связана с малыми телами как потенциальным источником вещества, достаточно удалена от плотной планетной зоны и уже использовалась в предыдущей главе как база сравнения через область Весты и перелёт Dawn.

Для первого приближения можно принять, что структура располагается в плоскости с умеренным наклоном относительно эклиптики:

$$i_{\text{struct}} \sim 5-7^\circ$$

где i_{struct} (structure inclination) — наклонение плоскости структуры относительно эклиптики.

Такое значение не является результатом точной оптимизации. Оно используется как практический ориентир: структура не задаётся строго в эклиптике, но и не уходит в высокое наклонение, которое резко увеличило бы цену входа аппаратов, обслуживания и повторного формирования. Диапазон $5-7^\circ$ также согласуется с выбором внутренней части главного пояса как расчётной области, где значимые малые тела могут иметь ненулевые, но умеренные наклонения.

Рабочее направление первого участка задаётся как выход из области 2,3–2,5 а.е. к внутренней Солнечной системе, условно к орбитальной области порядка 1 а.е.

При этом участок не должен пониматься как “прямая дорога к Земле”. Его функция состоит не в замене всего перелёта, а в облегчении перехода аппарата к более высокоэнергетической траектории, которая затем продолжается в почти пустом пространстве по баллистической или корректируемой схеме.

Для задания условия выгоды вводится угловой сектор высокоэнергетического выхода:

$$\Delta\theta_{\text{HE}}$$

где $\Delta\theta_{\text{HE}}$ (high-energy exit angular sector) — допустимый угловой сектор высокоэнергетического выхода относительно базового околосолнечного направления.

Под ним понимается допустимое угловое отклонение от базового околосолнечного направления, в пределах которого аппарат может перейти к более быстрому режиму движения.

В качестве первого расчётного ориентира можно принять:

$$\Delta\theta_{\text{HE}} \sim 5-15^\circ$$

Это значение не является готовым миссионным расчётом. Оно используется как практическая рамка: участок должен помогать аппарату входить не в произвольное направление, а в ограниченный сектор высокоэнергетического выхода. Если структура расширяет допустимое окно входа в этот сектор, снижает коррекционную цену и уменьшает требования к точности наведения, она получает орбитально-геометрический смысл.

Условие выгоды можно выразить качественно:

$$C_{\text{HE,with}} < C_{\text{HE,without}}$$

где:

- $C_{\text{HE,with}}$ (high-energy cost with structure) — суммарная цена выхода на высокоэнергетическую траекторию с использованием структуры;

- $C_{HE,without}$ (high-energy cost without structure) — суммарная цена такого же выхода без использования структуры.

Под C_{HE} здесь понимается не только импульсная цена Δv , но и совокупная цена режима: коррекции, требования к точности входа, расход рабочего тела ориентации, риск отклонения, ширина допустимого окна входа и повторяемость прохождения для серии аппаратов.

Следовательно, первый участок должен быть ориентирован так, чтобы его рабочий коридор перекрывал именно сектор высокоэнергетического выхода. Если участок сформирован в динамически удобной области, но не помогает аппарату входить в более выгодный угловой сектор движения, он остаётся физическим экспериментом, но не становится полноценной инфраструктурной средой.

Целевой срок жизни первого участка принимается как:

$$T_{service_life} \sim 10\text{--}30 \text{ лет}$$

Это означает, что выбранная орбитальная постановка должна быть достаточно устойчивой: дифференциальная прецессия, эффект Пойнтинга-Робертсона, зарядово-плазменные процессы, поперечное распыление и внутренний фазовый разброс не должны выводить структуру из рабочего диапазона быстрее, чем она успевает использоваться серией аппаратов.

Таким образом, первый практический участок в настоящей версии можно задать следующим расчётным образом:

Параметр	Первый расчётный ориентир
Область размещения	внутренняя часть главного пояса
Радиус от Солнца	2,3–2,5 а.е.
Рабочий ориентир	область, близкая к орбитальному диапазону Весты
Наклонение структуры	$i_{struct} \sim 5\text{--}7^\circ$
Направление выхода	к внутренней Солнечной системе, порядка 1 а.е.
Угловой сектор высокоэнергетического выхода	$\Delta\theta_{HE} \sim 5\text{--}15^\circ$
Длина первого участка	$L = 1\,000\,000 \text{ км}$
Рабочий диаметр	$D = 20 \text{ км}$
Целевой срок жизни	10–30 лет

Эта таблица не является готовым проектом миссии. Она задаёт практическую расчётную рамку для следующих глав. В ней фиксируется главное: первый участок строится не как произвольный цилиндр пыли, а как орбитально-согласованная область, расположенная в заданной зоне, имеющая умеренное наклонение и ориентированная на помощь переходу к высокоэнергетической траектории в сторону внутренней Солнечной системы.

Точное значение наклона, фазового положения и углового сектора $\Delta\theta_{не}$ должно определяться отдельным траекторным расчётом для конкретного окна запуска, класса аппарата, допустимого Δv , параметров распылителя и срока службы структуры. В настоящей версии эти параметры задаются как первый практический ориентир, достаточный для перехода к расчётам циклов высвобождения и сроков формирования.

28. Циклы доставки, скоростного распыления и высвобождения вещества

После оценки инфраструктурного выигрыша и орбитально-геометрической постановки первого участка необходимо перейти к вопросу о том, как первый участок структуры формируется практически. В предыдущих главах было показано, зачем нужен такой участок: он позволяет уменьшать цену перехода к более энергичной траектории, снижать коррекционные расходы, расширять окно входа и создавать повторяемый режим движения для серии аппаратов. Однако этот выигрыш возможен только в том случае, если дисперсная среда не возникает как разовый неконтролируемый выброс вещества, а формируется через управляемый технологический процесс.

В настоящей главе предполагается, что область размещения, направление выхода к внутренней Солнечной системе, ориентировочное наклонение и угловой сектор высокоэнергетического выхода уже заданы в предыдущей главе. Поэтому далее рассматривается не выбор орбитальной геометрии, а операция формирования рабочего профиля внутри уже выбранного коридора.

Ключевым элементом такого процесса является не просто доставка вещества, а его скоростное направленное распыление. Подготовленная рабочая фракция должна вводиться в расчётную область не как неподвижное облако, а как протяжённая полоса, формируемая движущимся распылителем. Именно движение распылителя задаёт продольную структуру участка, направление распределения вещества, возможность диагностики и последующую корректировку.

Разовый выброс вещества в одной точке создаёт локальное облако. Такое облако не имеет заданной продольной структуры, быстро теряет расчётную форму, растягивается, даёт неравномерный профиль плотности и плохо согласуется с будущим движением аппарата. Скоростное направленное распыление работает иначе: распылитель движется вдоль расчётного коридора и высвобождает вещество с заданным массовым расходом, фазой, направлением, рабочей шириной и поперечным профилем. Поэтому результатом становится не случайная пылевая область, а формируемый участок дисперсной инфраструктуры.

Цикл формирования в этой постановке можно записать так:

подготовка вещества -> выход распылителя в рабочую область -> движение вдоль расчётного коридора -> продольно-направленное распыление -> измерение рабочего профиля -> корректирующий проход -> повторение цикла

Такая схема превращает формирование участка из единичного события в повторяемую производственно-логистическую и кинетико-аэродинамическую операцию.

После уточнения массы первого участка необходимо различать два варианта этой операции. В масштабируемом локальном сценарии подготовка рабочей фракции выполняется в районе производственно-логистического узла: вещество

добывается, дробится, фракционируется, накапливается и затем высвобождается в рабочую область. В демонстрационно-инфраструктурном сценарии рабочая фракция может быть заранее подготовлена на Земле и доставлена к выбранной области как расходный материал первого проекта.

Это различие меняет источник вещества, но не меняет физику высвобождения. В обоих случаях настоящая глава рассматривает одну и ту же операционную задачу: как подготовленную фракцию ввести в расчётный коридор не разовым облаком, а продольно-направленным, измеряемым и корректируемым рабочим профилем.

Конкретный логический участок формирования

Полный участок слишком велик для непосредственного анализа процессов распыления, диагностики и коррекции. Поэтому далее вводится логический участок формирования — минимальная расчётная единица, на которой удобно рассматривать геометрию выпуска, массовый расход и рабочее включение вещества.

В настоящей главе принимается:

$$L_{\log} = 1000 \text{ км}$$

$$r_{\log} = 10 \text{ км}$$

и

$$D_{\log} = 2 * r_{\log}$$

$$D_{\log} = 20 \text{ км}$$

где:

$L_{\log}$ (logical segment length) — длина логического участка формирования;

$r_{\log}$ (logical segment radius) — рабочий радиус логического участка;

$D_{\log}$ (logical segment diameter) — рабочий диаметр логического участка.

Иными словами, практический участок в этой главе — это не линия и не плоскость, а протяжённый рабочий объём длиной 1000 км и диаметром 20 км.

Расчёт удобнее вести в километрах, поскольку сам объект имеет межпланетный масштаб. Для этого плотность переводится из кг/м^3 в кг/км^3 .

Так как:

$$1 \text{ км}^3 = 10^9 \text{ м}^3$$

то:

$$\rho_{\text{dust}} = 10^{-13} - 10^{-12} \text{ кг/м}^3$$

соответствует:

$$\rho_{\text{dust}} = 10^{-4} - 10^{-3} \text{ кг/км}^3$$

Объём логического участка:

$$V_{\log} = \pi * r_{\log}^2 * L_{\log}$$

$$V_{\log} = 3,14 * 10^2 * 1000$$

$$V_{\log} = 3,14 * 100 * 1000$$

$$V_{\log} \sim 314 \text{ 000 км}^3$$

При рабочей плотности:

$$\rho_{\text{dust}} = 10^{-4} - 10^{-3} \text{ кг/км}^3$$

масса вещества в одном логическом участке:

$$M_{\text{log}} = \rho_{\text{dust}} * V_{\text{log}}$$

Для нижней границы плотности:

$$M_{\text{log}} = 10^{-4} * 314\,000$$

$$M_{\text{log}} \sim 31 \text{ кг}$$

Для верхней границы плотности:

$$M_{\text{log}} = 10^{-3} * 314\,000$$

$$M_{\text{log}} \sim 314 \text{ кг}$$

где:

ρ_{dust} (dust density) — массовая плотность дисперсной среды;

V_{log} (logical segment volume) — объём логического участка;

M_{log} (logical segment mass) — масса вещества внутри логического участка;

Следовательно, широкий теоретический диапазон массы одного логического участка, при полном диапазоне рассматриваемых плотностей составляет:

$$M_{\text{log,theory}} \sim 31 - 314 \text{ кг}$$

Однако в практической части далее используется не весь широкий теоретический диапазон плотности, а его нижняя рабочая область. Поскольку первый участок мал, почти прямолинеен и не предназначен для выполнения сложных манёвров или торможения внутри самой среды, оптимальным является не максимальное насыщение, а минимально достаточное заполнение. Поэтому в качестве практического режима принимается масса порядка:

$$M_{\text{log,opt}} \sim 31 - 62 \text{ кг}$$

на логический участок длиной 1000 км.

Это принципиальное уточнение. Первый участок должен быть не максимально плотным, а достаточно плотным для выполнения направляющей, стабилизирующей и коррекционной функции. Избыточная плотность увеличивает эрозионную цену, усложняет формирование, повышает требования к защите аппарата и сокращает срок спокойной эксплуатации. Нижняя рабочая область, напротив, делает структуру легче, долговечнее и технологически доступнее.

Параметр	Значение
Длина логического участка	1000 км
Рабочий радиус	10 км
Рабочий диаметр	20 км
Объём логического участка	~ 314 000 км ³
Теоретическая плотность	10 ⁻⁴ –10 ⁻³ кг/км ³
Теоретическая масса логического участка	~ 31–314 кг

Параметр	Значение
Практический оптимальный режим	~ 31–62 кг

Важно, что в локальном масштабируемом сценарии величина $M_{log,opt} \sim 31\text{--}62$ кг относится уже к подготовленной рабочей фракции, а не к исходному веществу малого тела. Получение такой фракции в космосе не следует считать готовой технологией. Добыча, дробление, фракционирование до диапазона 50–70 мкм, морфологическая подготовка и стабильная выдача фракции в условиях малой гравитации, вакуума и автономной работы являются отдельной технологической задачей.

Целевая структура рабочей фракции

Для первого ограниченного проекта рабочую фракцию необходимо задавать не только по размеру, но и по форме, плотности материала, массе отдельной частицы и допустимому разбросу этих параметров.

Базовый размерный диапазон частиц может быть принят как:

$$d_p \sim 50\text{--}70 \text{ мкм}$$

Однако одинаковый диаметр не означает одинаковое физическое поведение. Частица диаметром 50–70 мкм, выполненная из лёгкого полимерного материала, силикатного материала или металла, будет иметь разную массу, разное отношение массы к площади сечения и разную эрозионную цену при столкновении с аппаратом.

Для сферической частицы:

$$V_p = 4/3 * \pi * (r_p)^3$$

$$m_p = \rho_{mat} * V_p$$

где:

V_p (particle volume) — объём отдельной частицы;

r_p (particle radius) — радиус частицы;

m_p (particle mass) — масса частицы;

ρ_{mat} (particle material density) — плотность материала частицы.

Следовательно, целевая фракция первого проекта должна задаваться как совокупность параметров:

- размерный диапазон частиц;
- близкая к сферической форма;
- узкий разброс по массе;
- узкий разброс по плотности материала;
- отсутствие крупных осколков, агломератов и угловатых частиц;
- допустимый диапазон отношения массы к площади сечения.

Для первого демонстрационного сценария, в котором фракция может быть подготовлена на Земле, это особенно важно. Земная подготовка позволяет заранее контролировать размер, форму и состав частиц, а не полагаться на случайную морфологию дроблёного астероидного материала.

Энергетико-импульсный диапазон рабочей фракции

Для первого рабочего участка целевая фракция должна выбираться не только по диаметру, форме и плотности материала, но и по энергии единичного столкновения с аппаратом. При относительной скорости порядка 10 км/с осторожным рабочим диапазоном можно считать энергию одной частицы порядка 0,005–0,03 Дж. В этом диапазоне энергия отдельного столкновения остаётся достаточно малой, чтобы эрозионное воздействие можно было рассматривать как инженерно рассчитываемый расход защитного слоя, а не как режим массового повреждения конструкции. Одновременно частицы сохраняют достаточный импульс для формирования измеримого взаимодействия со средой. Поэтому данный диапазон следует понимать как область, в которой ожидаемая польза от взаимодействия остаётся сопоставимой или превышает сопутствующую эрозионную цену для рассматриваемого первого сценария.

Ниже этого диапазона частица становится менее эффективной как элемент направленной среды: уменьшается её импульс, возрастает чувствительность к внешним возмущениям и снижается вклад в формирование устойчивого рабочего профиля. Выше этого диапазона возрастает риск локального эрозионного повреждения аппарата, особенно для плотных металлических, угловатых или агломерированных частиц.

Для сферических частиц диаметром 50–70 мкм в этот осторожный диапазон входят несколько базовых кандидатных материалов: силикатная фракция, стеклокерамическая фракция и алюминиевая фракция. Их преимущество состоит не в одинаковости свойств, а в том, что при выбранном размере и скорости они дают энергию единичного столкновения в допустимом для первого участка диапазоне.

Силикатная и стеклокерамическая фракции обладают хорошей термической и радиационной устойчивостью, но могут сохранять хрупкий характер разрушения при контакте. Алюминиевая фракция имеет близкую плотность к стеклокерамике, но отличается пластической деформируемостью, что может снижать риск хрупкого дробления и вторичного абразивного воздействия при столкновении с аппаратом. Если подробнее, то такая фракция лучше соответствует сразу нескольким требованиям: она повышает фазовую холодность структуры, уменьшает разброс траекторий частиц, снижает долю абразивных неправильных фрагментов, делает воздействие на аппарат более предсказуемым и повышает вероятность высокого коэффициента рабочего включения вещества.

Тем не менее базовая фракция первого участка не должна заранее сводиться к одному материалу. Более корректно рассматривать силикатную, стеклокерамическую и алюминиевую сферизированную фракцию как основные кандидатные варианты. Окончательный выбор должен определяться не названием материала, а попаданием в допустимый диапазон энергии единичного удара, импульса, отношения массы к площади сечения, фазовой устойчивости и эрозионной безопасности.

Для рассматриваемого сценария уменьшение энергии единичного столкновения обычно соответствует уменьшению массы частицы или относительной скорости взаимодействия, что снижает импульсный вклад и ухудшает устойчивость рабочего профиля.

Если структура формируется как система функционально различных сегментов, производственно-логистический узел должен учитывать не только массу вещества, но и назначение каждой партии фракции. Для направляющих, корректирующих, тормозных и демпфирующих участков могут требоваться разные параметры частиц: размерный диапазон, плотность, морфология, прочность, склонность к разрушению и контактное поведение при столкновении с защитной поверхностью

аппарата. Поэтому в развитой схеме формирование структуры представляет собой не выпуск однородной пыли, а последовательное размещение фракций с разными эксплуатационными функциями.

Поэтому для первого ограниченного проекта возможна более простая схема: подготовить рабочую фракцию на Земле и использовать космическую часть системы только для хранения, дозирования, направленного высвобождения, диагностики и коррекции. В таком варианте настоящая глава проверяет не всю цепочку космического производства, а наиболее важную для структуры операцию — превращение готовой фракции в протяжённый рабочий профиль.

Связь логического участка с полным минимальным участком

Полный минимальный участок, рассматриваемый в практической части, имеет длину:

$$L = 1\,000\,000 \text{ км}$$

Если логический участок имеет длину:

$$L_{\log} = 1000 \text{ км}$$

то число логических участков:

$$N_{\log} = L / L_{\log}$$

$$N_{\log} = 1\,000\,000 / 1000$$

$$N_{\log} = 1000$$

При практической массе одного логического участка:

$$M_{\log, \text{opt}} \sim 31\text{--}62 \text{ кг}$$

активная масса полного участка:

$$M_{\text{struct, opt}} = N_{\log} * M_{\log, \text{opt}}$$

$$M_{\text{struct, opt}} \sim 1000 * 31\text{--}1000 * 62 \text{ кг}$$

$$M_{\text{struct, opt}} \sim 31\,000\text{--}62\,000 \text{ кг}$$

или:

$$M_{\text{struct, opt}} \sim 31\text{--}62 \text{ т}$$

где:

$N_{\log}$ (number of logical segments) — число логических участков, из которых условно состоит полный минимальный участок;

$M_{\log, \text{opt}}$ (optimal logical segment mass) — практическая масса одного логического участка в принятом рабочем режиме;

$M_{\text{struct, opt}}$ (optimal full structure mass) — активная масса полного минимального участка в оптимальном практическом режиме.

Таким образом, в оптимальном практическом режиме полный минимальный участок требует не сотен тонн активной массы, а десятков тонн. Это резко меняет инженерную картину. Главным ограничителем становится не масса вещества, а ширина выпускной зоны, число продольных полос, точность распыления и качество начального задания среды.

Полный участок нельзя понимать как сумму простых выбросов. Он состоит из множества продольных рабочих профилей, которые должны быть правильно расположены в пространстве и времени, частично перекрыты, согласованы по плотности и введены в близкое орбитально-векторное состояние.

Продольная длина рабочего профиля

Если распылитель движется вдоль расчётного коридора и подаёт вещество в течение времени T_{feed} , то длина формируемого рабочего профиля определяется выражением:

$$L_{\text{spray}} = V_{\text{spray}} * T_{\text{feed}}$$

где:

V_{spray} (sprayer longitudinal velocity) — продольная скорость распылителя относительно рабочей области формирования;

T_{feed} (feed duration) — время непрерывной подачи вещества за один проход.

Массовый расход $\dot{M}_{\text{feed}}$ обозначается отдельно.

Важно различать эти величины. Время подачи характеризует длительность работы выпускной системы, а массовый расход — интенсивность подачи вещества. Поэтому $T_{\text{feed}} = 10\,000$ с не означает расход 10 кг/с; это только время работы выпускной системы.

В качестве базового расчётного режима удобно принять:

$$T_{\text{feed}} = 10\,000 \text{ с}$$

Это примерно:

2,8 ч

При продольной скорости распылителя:

$$V_{\text{spray}} = 0,1 \text{ км/с}$$

то есть:

$$100 \text{ м/с}$$

получаем:

$$L_{\text{spray}} = 0,1 * 10\,000$$

$$L_{\text{spray}} = 1000 \text{ км}$$

где:

$\dot{M}_{\text{feed}}$ (mass feed rate) — масса вещества, проходящая через выпускную систему за единицу времени;

L_{spray} (spray trail length) — длина рабочего профиля, сформированного распылителем за один проход;

M_{release} (released mass) — масса вещества, выпущенная за один проход распылителя.

То есть один проход распылителя при таких параметрах формирует продольный рабочий профиль длиной одного логического участка.

Продольная скорость распылителя	Время подачи	Длина рабочего профиля
0,01 км/с / 10 м/с	10 000 с	100 км
0,05 км/с / 50 м/с	10 000 с	500 км
0,1 км/с / 100 м/с	10 000 с	1000 км

Продольная скорость распылителя	Время подачи	Длина рабочего профиля
0,2 км/с / 200 м/с	10 000 с	2000 км

Эта таблица показывает, что продольная длина формируемого рабочего профиля задаётся не массой вещества, а связкой скорости распылителя и времени подачи. Масса отвечает за плотность, а скорость и время — за протяжённость.

В дальнейшем эту скорость следует понимать не как произвольный рычаг ускорения формирования, а как целевую продольную скорость рабочего вещества $V_{work,target}$. Она задаёт начальное кинематическое состояние частиц и поэтому влияет не только на длину рабочего профиля, но и на фазовую согласованность, поперечное распыление, относительную скорость взаимодействия с аппаратом, эрозионную и тепловую нагрузку. Поэтому увеличение этой скорости допустимо только в пределах, при которых вещество остаётся частью рабочего профиля структуры.

Выпускная зона и фактическая ширина сформированной полосы / профиля

Продольная ширина сформированной полосы не решает вопрос о рабочем диаметре участка. Логический участок имеет диаметр:

$$D_{log} = 20 \text{ км}$$

Но один распылитель не обязан и, в базовом первом сценарии, не должен формировать весь этот диаметр одним широким конусом. Предпочтительным является продольно-направленное распыление из распределённой выпускной зоны с малой поперечной составляющей. В таком режиме один распылитель формирует не весь рабочий диаметр, а одну продольную полосу.

Для описания этой полосы вводится параметр $D_{release}$.

$D_{release}$ (release zone diameter) — поперечный размер выпускной зоны распылителя, определяющий начальную ширину распределения вещества при формировании рабочего профиля.

Под этим параметром могут пониматься:

- ширина выпускного пояса;
- диаметр кольцевой зоны распыления;
- поперечный размер распределённой выпускной системы;
- рабочая ширина блока высвобождения вещества.

Не следует смешивать $D_{release}$ с шириной бака. Бак хранит подготовленную фракцию, но сам по себе не задаёт рабочий профиль. Этот профиль задаёт выпускная зона. Однако для равномерного продольного выпуска форма бака и форма выпускной зоны связаны. Цилиндрический, кольцевой или распределённый бак проще согласовать с равномерной подачей по выпускному поясу. Если бак имеет иную форму, требуется более сложная система внутреннего распределения вещества, дозирования, виброподачи, газовой, электростатической или механической транспортировки фракции к выпускной зоне.

Общая связь выглядит так:

→ бак хранит вещество;

- выпускная зона задаёт начальную ширину потока;
- поперечная скорость задаёт последующее расширение;
- продольная скорость распылителя задаёт длину рабочего профиля;
- массовый расход задаёт плотность рабочего профиля.

В первом рабочем сценарии поперечное расплывание рассматривается как нежелательный эффект, уменьшающий коэффициент рабочего включения вещества. Поэтому задача формирования состоит не в расчёте увеличенного диаметра профиля, а в минимизации поперечной скорости частиц и сохранении размеров профиля близкими к размерам выпускной зоны.

Из этого следует важное практическое ограничение. Если поперечное расширение рассматривается как потеря рабочего вещества, то ширина формируемого рабочего профиля определяется прежде всего геометрией самой выпускной системы. Иными словами, в первом приближении один проход распылителя способен сформировать только ту полосу вещества, которая непосредственно задаётся его выпускной зоной. Поэтому при анализе формирования минимального участка ключевым параметром становится не максимальная дальность разлёта частиц, а ширина области, которую один аппарат может качественно заполнить за один проход.

Почему один проход ограничен шириной выпускной зоны

Для первого практического сценария можно принять базовый вариант:

$$D_{\text{release}} = 50 \text{ м или } D_{\text{release}} = 0,05 \text{ км}$$

Такой размер уже является крупной инженерной выпускной системой. Даже 50 м потребуют раскрываемого пояса, распределённой щели, пучка микродозаторов или иной специальной конструкции. Поэтому более широкие варианты на первом этапе не должны приниматься как базовые, хотя именно их развитие в дальнейшем резко повысит эффективность формирования рабочего инфраструктурного участка структуры .

При этом увеличение D_{release} влияет на эффективность формирования значительно сильнее, чем увеличение массы одного распылителя. Если распыление почти прямое и поперечное расширение мало, то один проход закрывает по ширине только примерно:

$$0,05 \text{ км}$$

При рабочем диаметре логического участка:

$$D_{\text{log}} = 20 \text{ км}$$

идеальное число полос по диаметру:

$$N_{\text{width}} = D_{\text{log}} / D_{\text{release}}$$

$$N_{\text{width}} = 20 / 0,05$$

$$N_{\text{width}} = 400$$

где:

N_{width} (number of widthwise strips) — минимальное число продольных полос, необходимое для заполнения рабочего диаметра логического участка;

D_{log} (logical segment diameter) — рабочий диаметр логического участка;

D_{release} (release zone diameter) — ширина полосы, формируемой одним проходом распылителя при малом поперечном расплывании вещества.

То есть даже в идеальном расчёте нужно порядка 400 продольных полос, чтобы перекрыть диаметр 20 км.

Это нижний предел. В реальности необходимо учитывать перекрытие соседних полос, ошибки положения распылителя, пульсации подачи, фазовый разброс частиц, зоны недонасыщения между полосами и корректирующие проходы. Поэтому фактическое число полос может быть больше идеального. Однако уже сама идеальная оценка показывает главное: рабочий диаметр создаётся не одним проходом, а множеством продольных, смещённых или частично перекрывающихся следов.

Параметр	Значение
Рабочий диаметр логического участка	20 км
Поперечный размер выпускной зоны	50 м / 0,05 км
Идеальное число полос	~ 400
Главный ограничитель	ширина выпускной зоны и точность размещения полос

Увеличение выпускной зоны имеет геометрический эффект. Если поперечный размер выпускной зоны увеличить, она покрывает более широкую полосу и тем самым прямо уменьшает число необходимых проходов. Поэтому рост D_{release} резко уменьшает число необходимых полос и проходов. Например, переход от условной выпускной зоны 50 м к 100 м не просто облегчает формирование отдельной полосы, а позволяет покрывать значительно большую область поперечного профиля. Поэтому развитие раскрываемых, кольцевых и распределённых выпускных систем является прямым способом уменьшения числа проходов.

Это объясняет, почему многоаппаратность становится не дополнительным украшением схемы, а её практической необходимостью. Один распылитель формирует только свою полосу или рабочий профиль, а рабочий диаметр 20 км набирается множеством параллельных, смещённых или частично перекрывающихся проходов.

После уточнения активной массы участка это условие становится центральным. При $M_{\text{struct,opt}} \sim 31\text{--}62$ т ограничителем первого проекта является не масса вещества как таковая, а способность распределить её в нужной геометрии. Даже если вся рабочая фракция уже подготовлена и доставлена, она не превращается в структуру без достаточной рабочей ширины высвобождения, стабильного массового расхода, повторяемой навигации распылителя и диагностики рабочего профиля.

Поэтому D_{release} является одним из главных параметров главы. Увеличение рабочей ширины выпускной зоны сокращает число полос и проходов, а значит напрямую уменьшает срок формирования, число операций, требования к ресурсу аппаратов и объём последующей коррекции. В этом смысле геометрия высвобождения может быть важнее, чем простое увеличение массы вещества на борту распылителя.

Масса одной продольной полосы

В оптимальном практическом режиме масса одного логического участка составляет:

$$M_{\text{log,opt}} \sim 31\text{--}62 \text{ кг}$$

Если рабочий диаметр набирается примерно 400 продольными полосами, то масса вещества, приходящаяся на одну полосу одного логического участка, составляет:

$$M_{\text{strip,log}} = M_{\text{log,opt}} / 400$$

где:

$M_{\text{strip,log}}$ (logical strip mass) — масса вещества, приходящаяся на одну продольную полосу внутри логического участка;

$M_{\text{log,opt}}$ (optimal logical segment mass) — практическая масса логического участка в принятом рабочем режиме;

400 — оценочное число продольных полос, необходимое для заполнения рабочего диаметра логического участка при ширине выпускной зоны порядка 50 м.

Для нижней границы:

$$M_{\text{strip,log}} = 31 / 400$$

$$M_{\text{strip,log}} \sim 0,0775 \text{ кг}$$

Для верхней границы:

$$M_{\text{strip,log}} = 62 / 400$$

$$M_{\text{strip,log}} \sim 0,155 \text{ кг}$$

То есть:

$$M_{\text{strip,log}} \sim 78\text{--}155 \text{ г}$$

на одну продольную полосу длиной 1000 км.

Это значение важно для понимания масштаба. Масса отдельной полосы чрезвычайно мала, потому что сама структура является сверхразрезанной. Проблема заключается не в том, чтобы доставить сотни килограммов на каждый рабочий профиль, а в том, чтобы распределить небольшую массу на огромной длине и правильно разместить множество рабочих профилей в рабочем поперечном профиле.

Если один аппарат способен пройти не один логический участок, а всю длину минимального участка:

$$L = 1\,000\,000 \text{ км}$$

то он проходит:

$$1000$$

логических участков подряд.

Масса вещества на одну продольную полосу полного участка:

$$M_{\text{strip,total}} = M_{\text{strip,log}} * 1000$$

где $M_{\text{strip,total}}$ (total strip mass) — масса вещества в одной продольной полосе на всей длине минимального участка;

Для нижней границы:

$$M_{\text{strip,total}} \sim 0,0775 * 1000$$

$$M_{\text{strip,total}} \sim 77,5 \text{ кг}$$

Для верхней границы:

$$M_{\text{strip,total}} \sim 0,155 * 1000$$

$$M_{\text{strip,total}} \sim 155 \text{ кг}$$

То есть один аппарат, формирующий одну продольную полосу вдоль всего минимального участка длиной 1 000 000 км, несёт порядка:

75–155 кг

рабочей фракции.

Следовательно, первый проект ограничивается не грузоподъёмностью распылителей, а точностью формирования и шириной выпускной зоны.

Это меняет восприятие задачи. Даже если идеальное число полос составляет около 400, это не означает, что каждый проход должен нести тонны вещества. При оптимальной нижней плотности вся проблема смещается к ширине выпускной зоны, точности распыления, навигации и числу продольных проходов.

Последовательное и групповое формирование рабочего диаметра

Из предыдущего расчёта следует, что рабочий диаметр логического участка может формироваться несколькими способами.

Первый способ — последовательные смещённые проходы одного распылителя. Аппарат проходит один продольный рабочий профиль, затем смещается и проходит следующий. Такой вариант технически проще, но очень медленный.

Второй способ — последовательная цепочка распылителей. Один распылитель заканчивает материал или завершает рабочий проход, после чего следующий продолжает формирование соседней полосы или следующего продольного участка. Этот режим подходит для наращивания структуры вдоль длины.

Третий способ — параллельная группа распылителей. Несколько аппаратов одновременно формируют разные полосы внутри одного логического участка или вдоль всего минимального участка. Такой режим сокращает время формирования рабочего диаметра.

Четвёртый способ — смешанная схема. Основная группа распылителей создаёт базовые продольные полосы, а диагностические и корректирующие аппараты затем закрывают зоны недонасыщения, выравнивают плотность и уточняют фазовый профиль.

Базовый режим формирования не должен строиться на широком конусном раскрытии. Предпочтительным является продольно-направленное распыление из распределённой выпускной зоны с малой поперечной составляющей. В этом режиме один распылитель формирует не весь рабочий диаметр, а продольную полосу. Рабочий диаметр логического участка набирается серией параллельных, смещённых или частично перекрывающихся полос.

Это делает многоаппаратность не дополнительным украшением, а частью физико-инженерной логики структуры. Если выпускная зона одного распылителя мала по сравнению с рабочим диаметром участка, то инфраструктура должна формироваться либо большим числом проходов, либо группой аппаратов, либо сочетанием этих режимов.

Массовый расход и масса прохода

Масса, вводимая за один проход, определяется массовым расходом распыления и временем подачи:

$$M_{\text{release}} = \dot{M}_{\text{feed}} * T_{\text{feed}}$$

где:

M_{release} (released mass) — масса вещества, высвобожденная за один проход;

$\dot{M}_{\text{feed}}$ (mass feed rate) — массовый расход подачи вещества через выпускную систему;

T_{feed} (feed duration) — время подачи вещества за один проход.

Однако массовый расход не должен рассматриваться как полностью независимый параметр. Он должен быть согласован с длиной прохода, шириной выпускной зоны, требуемой массой полосы, продольной скоростью распылителя и допустимым начальным состоянием частиц. Если расход слишком мал, профиль может оказаться недонасыщенным. Если расход слишком велик, возникают локальные пики плотности, повышенная эрозионная цена и снижение коэффициента рабочего включения.

Для одной продольной полосы полного участка масса может составлять всего 75–155 кг, если аппарат формирует полосу вдоль всей длины 1 000 000 км. Это означает, что в первом оптимальном режиме важнейшей задачей становится не высокая производительность выброса, а стабильность, равномерность и точность распределения вещества по длине. Массовый расход должен не просто обеспечить нужную массу, а поддерживать требуемую плотность и фазово-векторное состояние рабочего профиля.

Поэтому необходимо различать два разных темпа:

Q_{prepare} — темп получения и подготовки рабочей фракции;

Q_{release} — темп дозированного высвобождения подготовленной фракции в расчётную область.

Для демонстрационно-инфраструктурного сценария с земной подготовкой вещества основная сложность переносится на Q_{release} , то есть на способность распылителей стабильно выдавать фракцию с нужной скоростью, шириной, направлением и равномерностью. Для масштабируемого локального сценария дополнительно появляется ограничение Q_{prepare} , поскольку рабочую фракцию ещё нужно получить из местного сырья.

Поэтому срок формирования не должен оцениваться одной общей величиной производительности. В первом приближении его следует разделять на:

$$T_{\text{prepare}} = M_{\text{ready}} / Q_{\text{prepare}}$$

и:

$$T_{\text{release}} = M_{\text{release}} / Q_{\text{release}}$$

где:

T_{prepare} (preparation time) — время подготовки рабочей фракции;

T_{release} (release time) — время дозированного высвобождения вещества;

M_{ready} (ready working fraction mass) — масса подготовленной рабочей фракции;

M_{release} (released mass) — масса, подаваемая в конкретном цикле или проходе;

Q_{prepare} (preparation rate) — темп получения и подготовки рабочей фракции;

Q_{release} (release rate) — темп дозированного высвобождения подготовленной фракции.

Для первого демонстрационного сценария T_{prepare} может быть вынесено на земную производственную базу, а в космической части основным становится T_{release} . Для локального масштабируемого сценария оба времени входят в полную длительность формирования. Это различие важно для следующей главы о сроках формирования: время первого проекта и время масштабируемого строительства не должны оцениваться одной и той же величиной.

Именно поэтому простой показатель “сколько вещества в баке” недостаточен. Нужно одновременно учитывать длину прохода, ширину выпускной зоны, массу рабочей фракции, массовый расход, равномерность подачи, фазовую согласованность, продольную скорость рабочего вещества и коэффициент рабочего включения.

Варианты баков и распределённых выпускных систем

Для первого сценария нельзя предполагать, что распылитель сразу имеет выпускную зону километровой ширины. Даже 50 м — это уже крупная система. Поэтому в рамках миссии бак и выпускная система должны рассматриваться как отдельная инженерная задача.

Возможны несколько вариантов.

Первый вариант — цилиндрический бак с продольной выпускной щелью. Это наиболее простой для описания вариант. Бак хранит подготовленную фракцию, а выпускная щель задаёт продольную полосу распыления. Цилиндрическая форма удобна тем, что её проще связать с равномерным распределением вещества вдоль выпускного пояса. Если бак имеет иную форму, требуется более сложная система внутреннего перемещения и выравнивания фракции.

Второй вариант — кольцевой бак с выпуском по окружности. В таком случае вещество хранится в кольцевой или тороидальной системе, а выпуск идёт через кольцевую зону. Этот вариант удобен для симметрии и балансировки, но технологически сложнее.

Третий вариант — раскрываемый распределённый бак. Аппарат или локально собранная конструкция имеет центральное хранилище и раскрываемые распределительные элементы: фермы, штанги, рукава, трубчатые линии, кассетные пояса или гибкие каналы подачи. После раскрытия вещество подаётся не из одной точки, а из распределённой выпускной зоны. Такой вариант особенно важен для первого этапа, потому что он позволяет увеличить D_{release} без необходимости создавать изначально огромный жёсткий корпус.

Раскрываемый распределённый бак может состоять из центральной ёмкости и нескольких расходящихся линий подачи, которые после раскрытия образуют выпускной пояс. Вещество из центрального бака поступает к микродозаторам или щелевым выпускным элементам, расположенным по ширине конструкции. Такая схема позволяет сохранить сравнительно компактный транспортный формат и получить большую рабочую ширину уже в зоне формирования структуры.

Четвёртый вариант — пучок малых баков-распылителей. Вместо одного большого бака используется группа малых модулей, каждый из которых формирует свою полосу. В совокупности они работают как распределённая выпускная система. Такой вариант удобен для масштабирования и отказоустойчивости.

Пятый вариант — пустотелый астероид как резервуар. В перспективе часть баков может создаваться локально из малых тел. Небольшой астероид может быть частично выработан изнутри, при этом внешняя оболочка остаётся естественным корпусом. Внутри размещается подготовленная фракция, а выпуск организуется через технологические каналы, щели или сопла. Такой вариант снижает потребность в доставке крупных баков с Земли, но требует сложной внутренней обработки и контроля подачи.

Шестой вариант — астероид-матрица с распределёнными выпускными каналами. Это более продвинутая схема. Астероид используется не просто как полый резервуар, а как объект с сетью внутренних каналов, через которые вещество

подаётся к нескольким выпускным зонам. В таком случае сам астероид становится крупной распределённой системой распыления. Преимущество — возможность формировать широкие выпускные зоны из локального материала. Недостаток — сложность управления расходом, неоднородность природного тела и высокая инерционность системы.

Седьмой вариант — гибкая оболочка или мешок с фракцией. Такой вариант может быть полезен для хранения вещества, но сам по себе он не решает вопрос равномерного выпуска. Гибкий мешок требует системы распределения: выпускного пояса, микродозаторов, внутренней подачи или раскрываемой конструкции. Поэтому он должен рассматриваться не как замена распределённому баку, а как один из способов хранения вещества внутри более сложной выпускной системы.

Восьмой вариант — кассетная система. Рабочая фракция хранится в сменных кассетах, каждая из которых подаёт вещество через собственный выпускной блок. Такая схема удобна для стандартизации, обслуживания и замены, но увеличивает число механических операций.

Для первой версии расчётного сценария наиболее рационально рассматривать три базовых класса:

- раскрываемый распределённый бак;
- пучок малых баков-распылителей;
- локально создаваемый резервуар из астероида или астероид-матрицу .

Эти варианты показывают разные способы получить распределённую выпускную зону без предположения о наличии изначально километрового жёсткого распылителя

Способы подачи вещества

Качество структуры зависит не только от формы бака, но и от способа подачи вещества к выпускной зоне. Разные способы дают разную равномерность, разную фазовую согласованность и разный коэффициент рабочего включения распылённого вещества.

Широкий внешний вихревой выброс в пространство не рассматривается как рабочий вариант, потому что он ухудшает продольную согласованность и превращает направленный след в расходящееся облако. Вихревой режим допустим только как внутренний способ равномерной подачи вещества к выпускной зоне, но не как внешний способ формирования рабочего инфраструктурного участка структуры.

Способ подачи	Векторная согласованность	Равномерность	Риск разброса	Диапазон рабочего включения вещества (η_{spray})	Комментарий
Простое высвобождение	низкая	низкая	высокий	0,2–0,5	ближе к облаку, чем к структуре

Способ подачи	Векторная согласованность	Равномерность	Риск разброса	Диапазон рабочего включения вещества (η_{spray})	Комментарий
Механическое дозирование через щель	средняя	средняя	средний	0,4–0,7	простой базовый вариант
Продольная распределённая щель	высокая	высокая	низкий/средний	0,6–0,9	предпочтительный базовый режим
Кольцевой выпуск	высокая при хорошей симметрии	высокая	средний	0,6–0,9	полезен для равномерности, сложнее конструктивно
Пучок синхронизированных микродозаторов	высокая	высокая	низкий	0,7–0,95	технологически сложный, но наиболее перспективный
Электростатический выпуск	высокая при управлении	средняя/высокая	низкий	0,7–0,95	может повышать точность и снижать разброс
Внутренняя вихревая подача к выпускной зоне	зависит от режима	высокая	средний	0,5–0,85	допустима как внутренняя система выравнивания подачи
Кассетная микроподача	высокая	средняя/высокая	низкий	0,6–0,9	удобна для стандартизированных распылителей

Эта таблица показывает, что $\eta_{\text{spray}} = 0,5$ является не обязательной нормой, а низкой или консервативной оценкой. Она может соответствовать простому высвобождению или грубому механическому дозированию. Более совершенные способы подачи — распределённая щель, микродозаторы, электростатический выпуск или хорошо синхронизированная кассетная подача — могут существенно повысить долю вещества, реально вошедшего в рабочий профиль структуры.

Поэтому в расчётах можно использовать $\eta_{\text{spray}} = 0,5$ как осторожный базовый сценарий, но не как предел сценария. В практической разработке задача состоит в повышении этого коэффициента за счёт улучшения геометрии выпуска, равномерности подачи, фракционного контроля и диагностики.

Коэффициент рабочего включения распылённого вещества

Не вся высвобожденная масса обязательно становится частью рабочего логического участка. Часть вещества может выйти за допустимый поперечный профиль, получить избыточный фазовый разброс, оказаться в зоне пониженной или повышенной плотности либо потребовать последующей коррекции.

Для описания этого эффекта вводится коэффициент рабочего включения распылённого вещества: η_{spray} . Он показывает, какая доля распылённой массы действительно вошла в рабочий профиль структуры и сохранила параметры, соответствующие принятому режиму формирования.

Следует отметить, что на данном этапе η_{spray} не является известной физической величиной. Напротив, это один из ключевых неопределённых параметров первого сценария. Его значение зависит от конструкции распылителя, геометрии выпускной зоны, начального распределения скоростей частиц, точности наведения аппаратов, поперечного расплывания вещества и выбранного критерия того, что считать рабочим профилем.

Поэтому используемые далее значения η_{spray} следует рассматривать не как прогноз реального результата, а как консервативные инженерные ориентиры и параметр чувствительности расчёта. Практическая задача первого проекта состоит не только в формировании участка, но и в экспериментальном определении диапазона достижимых значений η_{spray} для различных режимов высвобождения вещества.

Величину η_{spray} можно определить как отношение массы вещества, вошедшего в рабочий профиль, к полной массе, выпущенной в процессе формирования:

$$\eta_{\text{spray}} = M_{\text{work}} / M_{\text{release}}$$

где:

η_{spray} (spray inclusion coefficient) — коэффициент рабочего включения распылённого вещества;

M_{work} (working mass) — масса вещества, вошедшая в рабочий профиль и сохранившая требуемые параметры формирования.

Под M_{work} понимается не просто масса частиц, оставшихся в расчётной области, а масса, которая одновременно находится в допустимом пространственном профиле, сохраняет требуемую фракцию, имеет допустимый фазовый разброс, соответствует расчётному векторному состоянию и не создаёт локальных зон чрезмерной плотности.

Следует различать η_{spray} и ранее введённый коэффициент η_{work} . Коэффициент η_{spray} характеризует качество включения вещества на этапе формирования структуры, тогда как η_{work} относится уже к сформированному участку и характеризует долю вещества, сохраняющего рабочее состояние в процессе эксплуатации.

Иначе говоря, рабочей считается не вся масса, оказавшаяся внутри геометрического объёма. Рабочей считается только та масса, которая удовлетворяет совокупности условий:

$$r \leq r_{\text{log}}$$

$$\rho_{\min} \leq \rho_{\text{dust}} \leq \rho_{\max}$$

$$d_{p,\min} \leq d_p \leq d_{p,\max}$$

$$|\Delta v_{\text{particle}}| \leq \Delta v_{\text{allow}}$$

$$|\Delta X| \leq \Delta X_{\text{allow}}$$

где:

r (particle radial position) — расстояние частицы от расчётной оси или центра рабочего профиля;

$r_{\log}$ (logical segment radius) — допустимый радиус логического участка;

ρ_{dust} (local dust density) — локальная плотность дисперсной среды в области расположения частицы;

$\rho_{\min}$, $\rho_{\max}$ (minimum and maximum allowable density) — допустимые границы плотности рабочего профиля;

d_p (particle diameter) — размер частицы;

$d_{p,\min}$, $d_{p,\max}$ (minimum and maximum allowable particle size) — допустимые границы размерной фракции;

$\Delta v_{\text{particle}}$ (particle velocity deviation) — отклонение скорости частицы от расчётного режима;

Δv_{allow} (allowable velocity deviation) — максимально допустимое отклонение скорости частицы;

ΔX (phase-orbital state deviation) — отклонение фазово-орбитального состояния частицы от расчётного состояния;

ΔX_{allow} (allowable phase-orbital deviation) — максимально допустимое отклонение фазово-орбитального состояния.

Если:

$$M_{\text{release}} = 100 \text{ кг}$$

и:

$$\eta_{\text{spray}} = 0,5$$

то:

$$M_{\text{work}} = 50 \text{ кг}$$

Это не означает, что аппарат израсходовал половину бака. Это означает, что из выпущенной массы только половина вошла в рабочий режим структуры.

Оставшаяся масса не обязательно мгновенно покидает область формирования. Часть её может продолжать существовать в окрестности рабочего профиля в виде фоновой или переходной компоненты. Такая масса не участвует в выполнении целевой функции структуры, но при этом способна создавать дополнительное фазовое и динамическое воздействие на рабочую часть профиля.

Поэтому низкий η_{spray} означает не только увеличение расхода вещества на формирование, но и потенциальное ухудшение качества среды. Чем больше доля вещества, не вошедшая в рабочий профиль, тем выше вероятность появления нежелательного разброса плотности, дополнительных столкновений, локальных возмущений и ускоренного ухода структуры из расчётного состояния. В этом смысле η_{spray} влияет не только на эффективность формирования, но и на ожидаемую долговечность рабочего участка.

Доля бака, израсходованная за проход, определяется отдельно:

$$M_{\text{release}} / M_{\text{tank}}$$

где:

M_{tank} (tank mass) — масса рабочей фракции, находящаяся в баке распылителя.

Таким образом, η_{spray} — это не расход бака, не скорость распыления и не длина прохода. Это показатель качества рабочего включения распылённого вещества.

Причины потерь рабочего включения и способы их минимизации

Потери рабочего включения возникают не потому, что вещество исчезает, а потому, что часть вещества перестаёт соответствовать рабочему состоянию структуры. Оно может оставаться рядом с участком, но не выполнять нужную функцию.

Потеря рабочего включения	Причина	Как влияет	Как минимизировать
Выход за рабочий радиус	избыточная поперечная скорость, вибрации, разброс выпуска	вещество не входит в рабочую ширину	снижать поперечную скорость, использовать распределённую выпускную зону, корректировать смещёнными проходами
Неправильный фазовый разброс	выпуск в неправильной фазе, разные начальные скорости, несинхронная подача	частицы уходят из общего орбитального режима	синхронизировать выпуск, уменьшать разброс скоростей, дозировать малыми порциями
Неравномерная плотность	пульсации расхода, неоднородная подача из бака, пробки и скачки подачи	появляются пустоты и пики плотности	стабилизировать $\dot{M}_{\text{feed}}$, применять цилиндрический или кольцевой бак, использовать внутреннюю систему распределения
Неверный продольный профиль	изменение скорости распылителя или расхода во время прохода	рабочий профиль становится неодинаковым по длине	связывать $\dot{M}_{\text{feed}}$ с V_{spray} , контролировать скорость и расход в едином режиме
Фракционные потери	крупные, мелкие или неправильные частицы, агломераты	растёт эрозия или деградация структуры	фракционировать, удалять агломераты, контролировать диапазон 50–70 мкм

Потеря рабочего включения	Причина	Как влияет	Как минимизировать
Вещество внутри объёма, но не в рабочем режиме	неправильный вектор, скорость или локальная плотность	геометрически масса есть, но функционально структуры нет	считать рабочей только фазово-векторно согласованную массу
Коррекционные потери	часть вещества приходится компенсировать или исключать	растёт число проходов	измерять профиль после прохода и корректировать следующие полосы
Динамическое расхождение полос	соседние полосы имеют разные начальные состояния	появляются разрывы и неоднородность	использовать перекрытие, синхронизацию и диагностические проходы

Главное средство повышения η_{spray} — не увеличение массы выброса, а повышение качества начального задания вещества. Чем точнее задана геометрия выпуска, продольный вектор, массовый расход, фракционный состав и фазовое состояние, тем большая доля распылённого вещества становится рабочей частью структуры.

Распылители и диагностические аппараты как специализированный класс

Распылители и сопровождающие диагностические аппараты работают в дисперсной области дольше, чем обычные проходящие аппараты. Поэтому они должны быть не просто защищены накладками или временными проходными элементами, а конструктивно адаптированы к данной среде.

Именно на них должна отрабатываться аэродинамическая согласованность аппарата и среды: форма корпуса, эффективная площадь взаимодействия, устойчивость ориентации, защитные поверхности, допустимые углы встречи, эрозионная стойкость и реакция на фактический поток частиц.

Эти аппараты выполняют двойную функцию.

С одной стороны, они формируют структуру: доставляют подготовленную фракцию, распыляют её в нужной фазе, задают продольный след и корректируют профиль.

С другой стороны, они являются первыми практическими носителями данных о кинетической аэродинамике в направленной дисперсной среде. Их телеметрия должна использоваться для анализа фактического воздействия среды: эрозии, микрповреждений, стабилизирующих моментов, отклонений ориентации, распределения нагрузки и расхождения расчётного и реального профиля.

Поэтому диагностическая функция распылителей не менее важна, чем их транспортная функция. Они должны передавать данные, необходимые для улучшения будущих аппаратов, защитно-стабилизирующих модулей, форм распылителей, режимов входа, скоростей прохождения и допустимых плотностей среды.

Обычные аппараты, которые позже будут использовать структуру как транспортную среду, могут иметь подключаемые защитно-стабилизирующие модули. Но распылители и диагностические аппараты должны быть наиболее глубоко адаптированы к среде конструктивно, поскольку именно они работают в ней регулярно и формируют практическую базу для всей последующей архитектуры.

Формирование полного участка из логических участков

Полный участок длиной 1 000 000 км может быть сформирован как последовательность логических участков:

$$L = N_{\log} * L_{\log}$$

где:

$$N_{\log} = 1000$$

Каждый логический участок должен удовлетворять условиям:

$$\rho_{\min} \leq \rho_{\text{dust}} \leq \rho_{\max}$$

$$r_{\text{work}} \sim 10 \text{ км}$$

$$L_{\log} = 1000 \text{ км}$$

$$M_{\log, \text{opt}} \sim 31\text{--}62 \text{ кг}$$

Между соседними участками должно быть перекрытие или непрерывность профиля:

$$L_{\text{overlap}} > 0$$

или:

$$\rho_{\text{dust}}(s) \geq \rho_{\min}$$

на границе между участками

где:

r_{work} (working profile radius) — рабочий радиус профиля структуры;

L_{overlap} (overlap length) — длина перекрытия соседних логических участков.

s (longitudinal coordinate) — продольная координата вдоль структуры;

$\rho_{\text{dust}}(s)$ (local dust density as a function of longitudinal coordinate) — плотность среды в точке с продольной координатой s ;

$\rho_{\min}$ (minimum allowable working density) — минимально допустимая рабочая плотность.

Иначе структура превратится в набор отдельных следов, а не в непрерывный инфраструктурный участок.

Если каждый логический участок требует сотни продольных полос, то полный участок может потребовать сотни продольных проходов вдоль всей длины или их эквивалент при групповом формировании. Это делает первый участок тяжёлой инфраструктурой не по массе вещества, а по числу точных операций. Поэтому структура становится оправданной только в том случае, если в дальнейшем она обслуживает значительно больше аппаратов, чем участвовало в её создании.

Иными словами, структура не должна строиться как одноразовая трасса для одного аппарата. Она имеет смысл как многократно используемая среда, в которой затраты на создание распределяются на серию проходов, на повторяемую логистику и на повторяемое использование участка.

Измерение и корректирующие проходы

Каждый распылительный проход должен завершаться измерением результата. Без измерения скоростное распыление остаётся только расчётной операцией. С измерением оно становится элементом управляемой инфраструктуры.

После прохода необходимо определить:

- фактическую плотность среды;
- продольный профиль плотности;
- поперечный профиль плотности;
- фазовый разброс частиц;
- разброс скоростей;
- соответствие частиц рабочему диапазону 50–70 мкм;
- положение рабочего профиля относительно расчётного орбитального коридора;
- наличие зон повышенной или пониженной плотности;
- скорость начальной деградации профиля;
- влияние среды на распылитель или диагностический аппарат.

Формально профиль можно записать как:

$$\rho_{\text{dust}} = \rho_{\text{dust}}(s, r_{\text{perp}}, t)$$

где:

s (longitudinal coordinate) — продольная координата вдоль структуры;

r_{perp} (transverse coordinate) — поперечная координата;

t (time) — время.

Рабочее условие:

$$\rho_{\text{min}} \leq \rho_{\text{dust}}(s, r_{\text{perp}}, t) \leq \rho_{\text{max}}$$

Если:

$$\rho_{\text{dust}} < \rho_{\text{min}}$$

то требуется дополнительный распылительный проход.

Если:

$$\rho_{\text{dust}} > \rho_{\text{max}}$$

то зона может стать эрозионно или динамически нежелательной, и последующие проходы должны обходить её, сглаживать профиль или ждать частичного рассеяния.

Корректирующий проход отличается от основного тем, что вводит вещество не для общего заполнения, а для исправления конкретного отклонения. Он может закрывать область недостаточной плотности, сглаживать продольный профиль, уточнять поперечную ширину, устранять разрыв между полосами, восстанавливать фазовую согласованность или готовить участок к прохождению аппарата.

При этом измерение должно относиться не только к плотности. Для подтверждения, что сформирован именно рабочий участок структуры, а не разреженное облако, необходимо проверять несколько параметров одновременно:

$\rho_{\text{dust}}(s, r_{\text{perp}}, t)$ — плотностный профиль;

$d_p(s, r_{\text{пер}}, t)$ — сохранение рабочей фракции;

$\Delta v_{\text{particle}}(s, r_{\text{пер}}, t)$ — разброс скоростей частиц;

η_{spray} — доля вещества, действительно включившаяся в рабочий профиль.

Только совместная проверка этих параметров позволяет считать проход успешным. Если масса высвобождена, но фракция ушла из допустимого диапазона, профиль получился слишком узким, вектор движения рассогласован или значительная часть вещества оказалась вне рабочего коридора, операция должна учитываться не как полноценное формирование структуры, а как частичный или неудачный проход.

Следовательно, настоящая глава уточняет главный практический вывод предыдущих глав. После перехода к оптимальному режиму $M_{\log, \text{opt}} \sim 31\text{--}62$ кг и $M_{\text{struct}, \text{opt}} \sim 31\text{--}62$ т формирование первого участка перестаёт быть прежде всего задачей доставки огромной массы. Главным становится управляемое высвобождение: рабочая ширина выпускной зоны, стабильность массового расхода, точность движения распылителя, доля вещества, включённая в рабочий профиль, и возможность последующей диагностики.

В демонстрационно-инфраструктурном сценарии это делает первый проект ближе к реализации: наиболее сложная стадия подготовки фракции может быть выполнена на Земле, а в космосе проверяется операция направленного высвобождения и формирования рабочего профиля. В масштабируемом локальном сценарии добавляется более сложная задача: обеспечить не только Q_{release} , но и Q_{prepare} , то есть автономное получение рабочей фракции из местного вещества. Поэтому локальный сценарий остаётся основным для развития сети, но демонстрационный сценарий с земной подготовкой вещества становится более реалистичным первым шагом.

Альтернативный сценарий.

Теоретически можно представить альтернативный сценарий естественной дисперсной заготовки, при котором вещество не распыляется с нуля, а уже присутствует в нужной области пространства. В Солнечной системе действительно существуют естественные пылевые среды: межпланетное пылевое облако, зодиакальная пыль, пылевые полосы и продукты столкновений малых тел. Однако наличие пыли само по себе не создаёт рабочий инфраструктурный участок.

Для рабочего участка требуется не просто масса вещества, а узкий, протяжённый, направленный и диагностируемый коридор. Естественное облако обычно имеет слишком широкую, разреженную и динамически неоднородную структуру. Кроме того, оно может содержать крупные фрагменты, агломераты и частицы неправильной фракции, которые не только не помогают формированию рабочего инфраструктурного участка, но и создают дополнительную эрозионную опасность.

Поэтому переформатирование естественного облака в рабочий участок может оказаться сложнее, чем формирование структуры с нуля. Необходимо не только выделить подходящую фракцию, но и обезопасить рабочий коридор от нерабочей области: удалить, измельчить или обойти крупные фрагменты, выровнять плотность, задать продольный вектор и обеспечить фазовую согласованность.

Такой вариант может иметь смысл только локально, если будущий участок рабочего инфраструктурного участка уже проходит через область, где естественная дисперсная среда близка к требуемому режиму. В этом случае она может использоваться как вспомогательная заготовка или источник вещества. Но в качестве основного способа формирования первого участка предпочтительнее

остаётся направленное продольное распыление, поскольку оно сразу задаёт нужное начальное состояние среды.

Итог главы

В настоящей главе показано, что практическое формирование первого участка определяется прежде всего качеством высвобождения вещества. После перехода к нижнему рабочему режиму плотности масса перестаёт быть главным ограничителем. На первый план выходят ширина выпускной зоны, число продольных полос, равномерность подачи, точность движения распылителей, коэффициент рабочего включения и возможность измерить полученный профиль.

Основная инженерная идея состоит в отказе от широкого неконтролируемого распыления. Поперечное распыление вещества рассматривается не как преимущество, а как источник потерь при формировании структуры. Оно уменьшает долю вещества, вошедшего в рабочий профиль, и тем самым снижает коэффициент рабочего включения распылённого вещества (η_{spray}).

Поэтому предпочтительной становится схема продольно-направленного формирования: вещество вводится в структуру узкими согласованными проходами, которые затем образуют рабочий профиль.

Такой подход меняет смысл производственно-логистического узла. Он должен не просто доставить массу вещества, а подготовить фракцию, обеспечить её дозированное высвобождение, задать начальное состояние частиц и организовать измерение результата. Только при выполнении этих условий дисперсное вещество перестаёт быть облаком и становится рабочей инфраструктурной средой.

Итоговый вывод заключается в том, что первый участок формируется не после распыления, а в момент распыления. Именно на этапе высвобождения задаются плотность, направленность, фазовая согласованность, долговечность и будущая эксплуатационная ценность структуры. Поэтому главным результатом процесса является не масса выпущенного вещества сама по себе, а формирование устойчивой дисперсной среды, способной воспроизводимо обеспечивать аэродинамические эффекты космической среды: направляющее воздействие, снижение коррекционной цены, стабилизацию прохождения и подготовку аппарата к последующему баллистическому участку траектории.

29. Срок формирования первого участка, чувствительность к параметрам и критерий расширения

После описания циклов доставки, скоростного распыления и высвобождения вещества необходимо оценить срок формирования первого участка и определить, при каких условиях такой участок может считаться не только экспериментальной проверкой, но и начальным элементом инфраструктуры.

В предыдущей главе было показано, что ограничителем первого участка является не только масса вещества, но и способ её превращения в рабочую среду: рабочая ширина выпускной зоны, число продольных полос, целевая скорость рабочего вещества, массовый расход, коэффициент рабочего включения, точность размещения рабочего профиля, диагностика и корректирующие проходы.

Поэтому срок формирования нельзя оценивать одной величиной массы или одной производительностью распылителя. Необходимо различать три связанные задачи: — чистое кинематическое время формирования продольного профиля;

— срок покрытия рабочего диаметра участка;
— полный срок формирования с учётом диагностики, коррекции, резервов, отказов, фазирования и организационной схемы работы распылителей.

Иными словами, первый участок ограничивается не тем, можно ли доставить десятки тонн рабочей фракции, а тем, можно ли распределить эту фракцию в нужной геометрии, в нужном фазовом состоянии и за срок, меньший характерного времени деградации уже созданных элементов структуры.

Чистое время формирования одной продольной полосы

В качестве первого расчётного ориентира принимается целевая продольная скорость рабочего вещества:

$$V_{\text{work,target}} \sim 0,1 \text{ км/с}$$

Эта величина не является произвольной скоростью ускоренного строительства. Она задаёт начальное кинематическое состояние вещества и должна быть согласована с фазовым разбросом, поперечным расширением, эрозионной нагрузкой, тепловым режимом и долговечностью структуры.

При длине минимального участка:

$$L = 1\,000\,000 \text{ км}$$

чистое время формирования одной продольной полосы составляет:

$$T_{\text{strip}} = L / V_{\text{work,target}}$$

где:

- T_{strip} (single strip formation time) — время, необходимое для формирования одной продольной полосы по всей длине участка;
- L (structure length) — длина формируемого участка структуры;
- $V_{\text{work,target}}$ (target longitudinal velocity of working particles) — целевая продольная скорость рабочего вещества, определяющая кинематический режим формирования.

При:

$$L = 1\,000\,000 \text{ км}$$

и:

$$V_{\text{work,target}} = 0,1 \text{ км/с}$$

получаем:

$$T_{\text{strip}} = 10\,000\,000 \text{ с}$$

Это примерно:

116 суток

Следовательно, 116 суток — это не срок формирования всего участка, а чистое время одной продольной полосы при выбранном кинематическом режиме рабочего вещества.

Эта величина показывает нижнюю кинематическую оценку. Она означает, что при выбранной целевой скорости рабочего вещества одна продольная полоса длиной 1 000 000 км формируется за время порядка четырёх месяцев. Но полный участок

имеет не одну полосу, а рабочий поперечный профиль диаметром порядка 20 км, поэтому для оценки полного срока необходимо учитывать ширину выпускной зоны и число полос.

Почему 116 суток не являются сроком полного участка

Число 116 суток может быть ошибочно понято как срок создания всей структуры. Это неверно. Оно относится только к одному продольному профилю, если распылитель или группа выпускных элементов формирует одну полосу вдоль всей длины участка.

Полный участок должен иметь не только продольную протяжённость, но и рабочий поперечный диаметр. В предыдущей главе для первого сценария был принят рабочий диаметр:

$$D_{\log} = 20 \text{ км}$$

Если один распылитель имеет выпускную зону шириной только:

$$D_{\text{release}} = 50 \text{ м} = 0,05 \text{ км}$$

то он покрывает не весь диаметр, а лишь одну узкую продольную полосу. Чтобы набрать весь рабочий диаметр, необходимо множество параллельных, смещённых или частично перекрывающихся полос.

Именно поэтому срок формирования зависит прежде всего от двух параметров:

- рабочей ширины выпускной зоны;
- числа распылителей, работающих параллельно или квазипараллельно.

Масса вещества при этом остаётся важной, но уже не является главным ограничителем. При оптимальном режиме активная масса полного участка составляет порядка 31–62 т, а масса одной полной продольной полосы может составлять всего 75–155 кг. Это означает, что основной инженерной задачей становится обеспечение требуемой геометрии профиля и согласованности проходов.

Зависимость срока от рабочей ширины выпускной зоны

Рабочий диаметр первого участка принимается равным:

$$D_{\log} = 20 \text{ км}$$

Если рабочая ширина выпускной зоны составляет:

$$D_{\text{release}} = 50 \text{ м} = 0,05 \text{ км}$$

из предыдущей главы следует, что для покрытия рабочего диаметра требуется порядка:

$$N_{\text{width}} \sim 400 \text{ продольных полос.}$$

Это означает, что один узкий распылитель, последовательно формирующий все полосы, даёт чрезмерно долгий срок создания участка. Поэтому практически значимыми становятся два направления сокращения срока:

- увеличение рабочей ширины выпускной зоны;
- параллельная либо квазипараллельная работа группы распылителей.

Рабочая ширина выпускной зоны	Идеальное число продольных полос	Чистый срок одним распылителем
50 м	400	~ 127 лет
100 м	200	~ 63,5 года
500 м	40	~ 12,7 года
1 км	20	~ 6,35 года
2 км	10	~ 3,17 года
5 км	4	~ 1,27 года
10 км	2	~ 0,64 года
20 км	1	~ 116 суток

Эта таблица показывает, что при фиксированной целевой скорости рабочего вещества срок формирования определяется главным образом не массой пыли, а геометрией выпуска. Чем шире рабочая выпускная зона, тем меньше требуется продольных полос и тем короче чистое время формирования. В текущем расчётном варианте именно эта зависимость уже выделялась как ключевая: при ширине 50 м срок одним распылителем становится порядка 127 лет, а при ширине 20 км чистый срок сводится к одной продольной операции длительностью около 116 суток.

Однако увеличение ширины выпускной зоны не является простым решением. Более широкая система требует более сложного бака, распределённой подачи, синхронизации выпускных элементов, контроля равномерности и диагностики фактического профиля. Поэтому практически важна не максимальная ширина, а такая ширина, при которой сохраняются равномерность плотности, фазовая согласованность, допустимый разброс скоростей и высокий коэффициент рабочего включения вещества.

Зависимость срока от числа распылителей

Если базовая рабочая ширина выпускной зоны остаётся равной 50 м, то вместо одного аппарата, выполняющего сотни проходов, можно рассматривать схему параллельного или квазипараллельного формирования.

В квазипараллельном режиме аппараты не обязательно работают строго одновременно. Возможна другая схема: после прохода одного распылителя выполняется быстрая диагностика, затем при нормальном профиле в ближайшее рабочее окно выходит следующий аппарат, а при выявлении ошибки один или несколько аппаратов выполняют корректирующий проход.

Под числом параллельных распылителей здесь понимается не только строго одновременная работа, но и плотная последовательность аппаратов с минимальной задержкой между проходами.

Число параллельных или квазипараллельных распылителей	Чистый срок формирования при ширине выпускной зоны 50 м
1	~ 127 лет
10	~ 12,7 года
50	~ 2,5 года
100	~ 1,27 года
200	~ 0,64 года
400	~ 116 суток

Эта таблица является нижней оценкой, поскольку она не учитывает фазирование, диагностику, коррекцию, резерв на отказы и техническую сложность синхронного или почти синхронного запуска большого числа распылителей. Но она показывает важный практический результат: первый участок становится инженерно понятнее не как работа одного многоразового аппарата, а как групповая операция большого числа специализированных распылителей. В старом варианте главы этот вывод уже присутствовал: при ширине 50 м один аппарат даёт чрезмерно долгий срок, а группа из 50–100 аппаратов переводит задачу в диапазон нескольких лет или около года.

При схеме “один распылитель — одна продольная полоса” активная масса рабочего вещества для полного участка остаётся в диапазоне примерно 31–62 т, а масса одной полной продольной полосы составляет примерно 75–155 кг.

При этом активная масса рабочего профиля не равна полной массе высвобождаемой фракции. Если принять осторожный коэффициент рабочего включения вещества $\eta_{\text{spray}} \sim 0,5$, то для получения активной массы 31–62 т потребуется высвободить примерно вдвое большую массу подготовленной фракции:

$$M_{\text{release,total}} \sim M_{\text{struct,opt}} / \eta_{\text{spray}}$$

При $\eta_{\text{spray}} \sim 0,5$ это даёт:

$$M_{\text{release,total}} \sim 62\text{--}124 \text{ т}$$

Эта величина относится не к массе одновременно находящейся в рабочем профиле, а к суммарной массе подготовленной фракции, которую необходимо высвободить с учётом неполного рабочего включения. Поэтому даже с осторожной поправкой на η_{spray} главным ограничителем остаётся не сама масса фракции, а число распылителей, рабочая ширина выпускной зоны, точность формирования и диагностика профиля.

Это означает, что каждый отдельный распылитель не обязан быть сверхтяжёлым грузовым аппаратом. Он может быть специализированным носителем относительно малой массы рабочей фракции, но с высокой точностью навигации, стабильной выпускной системой, диагностикой и защитой от работы в дисперсной среде.

Комбинированные сценарии формирования

На практике наиболее вероятным является не один крайний вариант, а сочетание увеличенной выпускной зоны и групповой работы.

Например, если рабочая ширина выпускной зоны увеличена до 500 м, то идеальное число продольных полос уменьшается до 40. В этом случае даже группа из 10 распылителей может сформировать участок в нижней кинематической оценке примерно за 1,27 года.

Если рабочая ширина выпускной зоны составляет 1 км, то число полос уменьшается до 20. При 10 квазипараллельных распылителях нижняя оценка срока становится порядка 0,64 года, то есть около 7–8 месяцев.

Если рабочая ширина выпускной зоны составляет 2 км, то число полос уменьшается до 10. При 10 распылителях нижняя оценка приближается к 116 суткам.

Эти сценарии не являются готовым проектом. Они показывают чувствительность задачи. Первый участок становится практически реалистичнее не при бесконечном росте массы вещества, а при сочетании трёх факторов:

- расширение выпускной зоны;
- групповая работа распылителей;
- повышение качества рабочего включения вещества.

Именно эта тройка определяет, может ли участок быть создан в срок, сопоставимый с несколькими месяцами, годом или несколькими годами, а не с десятилетиями.

Чувствительность к основным параметрам

Срок формирования первого участка зависит не от одного параметра, а от связанной группы величин. Особенно важны рабочая ширина выпускной зоны, число параллельных или квазипараллельных распылителей и коэффициент рабочего включения вещества. Первые два параметра определяют, может ли участок быть создан в практически значимый срок. Третий параметр определяет качество формирования: какая часть высвобожденной массы действительно становится рабочей частью структуры.

Отдельно следует учитывать морфологическую и массовую однородность рабочей фракции. Для частиц одного номинального диаметра масса может существенно различаться в зависимости от плотности материала. Поэтому размерный диапазон 50–70 мкм должен дополняться контролем формы, состава, плотности и массы частиц. Чем ближе частицы к сферическим и чем уже разброс их массы и отношения массы к площади сечения, тем выше фазовая холодность структуры, ниже эрозионная неопределённость и выше вероятность эффективного включения вещества в рабочий профиль.

Параметр	Что изменяется	Последствие для проекта
Рабочая ширина выпускной зоны	уменьшение ширины увеличивает число продольных полос	растёт число проходов, аппаратов или длительность формирования
Число параллельных распылителей	уменьшение числа аппаратов снижает	растёт общий срок создания участка

Параметр	Что изменяется	Последствие для проекта
	параллельность формирования	
Коэффициент рабочего включения вещества	меньше вещества попадает в рабочий профиль	растёт требуемый запас фракции, число коррекций и объём диагностики
Целевая продольная скорость рабочего вещества	меняется начальное кинематическое состояние среды	меняется не только срок, но и фазовая согласованность, поперечное распыление и эрозионный режим
Поперечная скорость высвобождения	увеличивает ширину рабочего профиля, но ухудшает согласованность	возможно расширение полосы ценой роста фазового разброса
Массовая однородность частиц	меняет разброс импульса и энергии столкновений	влияет на эрозионную безопасность и долговечность структуры
Диагностика после прохода	выявляет дефекты профиля	без диагностики невозможно отличить структуру от разреженного облака
Корректирующие проходы	исправляют недонасыщенные или рассогласованные зоны	увеличивают срок, но повышают качество рабочего участка
Ресурс распылителей	ограничивает число проходов и повторных операций	влияет на необходимость резервных аппаратов
Срок деградации первых полос	задаёт допустимый максимум срока формирования	если формирование слишком долгое, первые полосы начнут деградировать до завершения участка

Из этой таблицы следует, что первый участок чувствителен не только к массе вещества и скорости распыления. Он чувствителен к тому, насколько точно вещество включается в рабочий профиль. Если η_{spray} низок, то увеличение массы выброса может не решить проблему: часть вещества всё равно уйдёт в нерабочую область, создаст неоднородность или потребует коррекции.

Поэтому в практическом проекте важнее не максимальный расход вещества, а точность его начального задания.

Коэффициент рабочего включения и его влияние на срок

Коэффициент рабочего включения вещества показывает, какая часть высвобожденной массы действительно стала частью рабочего профиля структуры.

Если коэффициент равен 0,5, то из 100 кг выпущенной массы только 50 кг вошли в нужный рабочий режим. Остальная масса не исчезает, но она не выполняет расчётную функцию: может выйти за рабочий радиус, получить неправильный фазовый разброс, сформировать слишком низкую или слишком высокую локальную плотность либо потребовать корректирующих проходов.

Снижение коэффициента рабочего включения влияет на проект сразу по нескольким направлениям:

- увеличивает требуемый запас подготовленной фракции;
- увеличивает число проходов;
- увеличивает объём диагностики;
- увеличивает число корректирующих операций;
- повышает риск неоднородности;
- может удлинить срок формирования настолько, что первые полосы начнут деградировать до завершения всего участка.

Поэтому реальный срок формирования должен оцениваться не только как время прохождения распылителей, но и как время достижения рабочего профиля. Если распыление выполнено быстро, но профиль не соответствует требованиям, участок ещё не сформирован.

Для первого проекта допустимо использовать осторожный сценарий с $\eta_{\text{spray}} \sim 0,5$, но целью разработки должно быть повышение этого коэффициента за счёт распределённой выпускной зоны, микродозаторов, электростатического или механически стабилизированного выпуска, контроля фракции и диагностики после каждого прохода. В предельном случае именно η_{spray} определяет, превращается ли дополнительная масса фракции в рабочую среду или лишь увеличивает объём нерабочего вещества вокруг профиля.

Чистый срок и полный срок формирования

Чистый срок формирования — это нижняя кинематическая оценка. Он показывает, сколько времени заняло бы формирование участка при идеальном отсутствии задержек, отказов, ожидания окон, диагностики, коррекций и деградации.

Но полный срок формирования должен включать дополнительные факторы:

- время доставки распылителей к рабочей области;
- время вывода распылителей на нужный продольный режим;
- время подготовки к выпуску;
- фактическое время распыления;
- время диагностики рабочего профиля;
- время обработки данных;
- время корректирующих проходов;
- резерв на отказы;
- запас на недовключение вещества в рабочий профиль;
- фазирование группы распылителей;
- проверку безопасности рабочего коридора;

— возможное раннее обслуживание уже созданных полос.

В общем виде полный срок можно представить как:

$$T_{\text{form,total}} = T_{\text{form,clean}} * K_{\text{diag}} * K_{\text{corr}} * K_{\text{reserve}}$$

где:

- $T_{\text{form,total}}$ (total formation time) — полный срок формирования рабочего участка с учётом всех технологических и эксплуатационных операций;
- $T_{\text{form,clean}}$ (clean formation time) — чистое кинематическое время формирования без учёта диагностики, корректирующих проходов и организационных задержек;
- K_{diag} (diagnostic factor) — коэффициент увеличения срока формирования, связанный с диагностикой, измерением параметров профиля и обработкой результатов наблюдений;
- K_{corr} (correction factor) — коэффициент увеличения срока формирования, связанный с необходимостью корректирующих проходов и исправления выявленных отклонений профиля;
- K_{reserve} (reserve factor) — коэффициент резерва, учитывающий возможные отказы оборудования, задержки операций, фазирование аппаратов и иные эксплуатационные ограничения.

Эта запись является не строгой физической формулой, а укрупнённой мультипликативной оценкой полного срока формирования. Она показывает, что диагностика, корректирующие проходы, резервы на отказы, фазирование и эксплуатационные ограничения увеличивают чистое кинематическое время. В более детальной модели эти множители должны быть заменены отдельным календарно-операционным расчётом.

Для первого сценария не следует выбирать один точный коэффициент. Правильнее задать осторожный диапазон. Если чистая кинематическая оценка даёт срок 0,5–2,5 года при групповой работе распылителей, то полный практический срок может быть в 1,5–3 раза больше. Тогда реальный диапазон может смещаться к 1–5 годам в зависимости от ширины выпускной зоны, числа аппаратов и качества рабочего включения.

Это не провал сценария. Напротив, это нормальный переход от идеального расчёта к инфраструктурной операции. Важно, что даже с такими поправками задача остаётся в пределах крупных космических программ, а не уходит автоматически в столетний горизонт.

Оценочные сценарии срока формирования

Для первого участка можно выделить три ориентировочных сценария.

Первый сценарий — узкий одиночный распылитель. Рабочая ширина выпускной зоны 50 м, один аппарат или малая группа, последовательное покрытие полос. Такой вариант даёт срок десятки лет и практически непригоден как основной способ формирования полного участка. Его можно рассматривать только как локальный демонстрационный тест, но не как рабочий метод создания всего участка диаметром 20 км.

Второй сценарий — групповая операция с узкими распылителями. Рабочая ширина выпускной зоны остаётся 50 м, но используется группа из 50–100 распылителей. Чистый срок в этом случае находится примерно в диапазоне от 2,5 года до 1,27 года. С учётом диагностики, коррекции и резервов полный срок может составлять несколько лет. Такой вариант уже можно рассматривать как крупный, но предметно обсуждаемый первый инфраструктурный проект.

Третий сценарий — распределённая выпускная зона и группа распылителей. Рабочая ширина выпускной зоны увеличивается до 500 м–2 км, а число распылителей составляет от нескольких до нескольких десятков. В этом случае чистый срок может быть снижен до месяцев или около одного года. С учётом практических поправок такой сценарий может дать полный срок порядка 1–3 лет.

Для первого ограниченного расчётного сценария наиболее рациональным выглядит не один гигантский распылитель и не один малый аппарат, а промежуточная схема:

- рабочая ширина выпускной зоны больше 50 м;
- распылители работают группой;
- каждый аппарат формирует одну или несколько продольных полос;
- диагностика выполняется после проходов;
- корректирующие аппараты закрывают зоны недонасыщения;
- структура принимается не по факту выброса массы, а по факту достижения рабочего профиля.

Полный срок формирования и срок деградации

Срок формирования должен сравниваться со сроком деградации структуры. Если формирование полного участка занимает дольше, чем первые созданные полосы сохраняют рабочий режим, структура не успевает стать цельным инфраструктурным объектом.

Поэтому должно выполняться условие:

$$T_{\text{form,total}} < T_{\text{degradation}}$$

где:

- $T_{\text{form,total}}$ (total formation time) — полный срок формирования рабочего участка с учётом диагностики, корректирующих проходов, резервов и эксплуатационных ограничений;
- $T_{\text{degradation}}$ (structure degradation time) — характерное время деградации рабочего профиля структуры, после которого его параметры выходят за допустимые рабочие пределы.

Это условие является минимальным критерием реализуемости первого участка.

Для первого участка в динамически спокойной области и при нижнем рабочем режиме плотности целевой горизонт сохранения инфраструктурного эффекта может рассматриваться на уровне порядка 10–30 лет. Это не означает, что структура вообще не будет изменяться в течение этого срока. Это означает, что при правильном начальном задании, низкой плотности, фазовой холодности и диагностике она может сохранять полезный режим достаточно долго, чтобы быть сформированной, проверенной и использованной серией аппаратов.

Если полный срок формирования составляет 1–5 лет, а первый срок эксплуатации оценивается как 10–30 лет, то участок имеет инфраструктурный смысл. Если срок формирования приближается к десятилетиям, он теряет преимущество: первые полосы начнут требовать восстановления до завершения полного рабочего профиля.

Именно поэтому рабочая ширина выпускной зоны и групповая операция распылителей являются не вопросом удобства, а условием инфраструктурности.

Статус первого участка после формирования

После завершения формирования первый участок не должен сразу считаться полноценной межпланетной трассой. Его статус более ограничен. Он является первым протяжённым рабочим сегментом, предназначенным для проверки и демонстрации следующих функций:

- достижение расчётной плотности;
- сохранение рабочей фракции;
- поддержание допустимого поперечного профиля;
- подтверждение фазовой и векторной согласованности;
- измерение коэффициента рабочего включения вещества;
- проверка входа аппарата в рабочий коридор;
- проверка стабилизационного и коррекционного эффекта;
- оценка эрозионной цены прохождения;
- диагностика деградации во времени;
- проверка возможности корректирующих проходов;
- проверка повторяемого использования участка.

Только после подтверждения этих функций участок может рассматриваться как начальный элемент инфраструктуры. До этого он остаётся экспериментально-инфраструктурным объектом: уже не простым опытом с облаком частиц, но ещё не полноценной транспортной системой.

Критерий расширения

После формирования первого участка возникает вопрос: когда можно переходить к расширению?

Расширение не должно начинаться только потому, что удалось высвободить заданную массу вещества. Масса сама по себе не доказывает инфраструктурность. Критерий расширения должен быть связан с подтверждением функций участка.

Минимальный критерий расширения может быть сформулирован так:

первый участок может быть расширен, если он сформирован в срок, меньший срока деградации, сохраняет рабочий профиль, подтверждает повторяемый вход аппаратов, даёт измеримый коррекционный или стабилизационный эффект, имеет допустимую эрозионную цену и может быть восстановлен или скорректирован после проходов.

Иными словами, должны быть выполнены семь условий.

Первое условие — временное:

$$T_{\text{form, total}} < T_{\text{degradation}}$$

Участок должен быть создан быстрее, чем деградируют первые сформированные полосы.

Второе условие — плотностное:

рабочая плотность должна находиться в допустимом диапазоне, без зон опасной концентрации и без разрывов ниже минимального порога.

Третье условие — фракционное:

рабочая фракция должна сохранять допустимый диапазон размеров, формы, массы и отношения массы к площади сечения.

Четвёртое условие — геометрическое:

рабочий профиль должен сохранять требуемый радиус, длину, поперечное распределение и непрерывность между логическими участками.

Пятое условие — кинематическое:

частицы должны сохранять допустимый вектор движения, фазовую согласованность и малый разброс скоростей.

Шестое условие — эксплуатационное:

аппарат или защитно-стабилизирующий модуль должен проходить участок без недопустимой эрозионной и тепловой цены.

Седьмое условие — инфраструктурное:

участок должен быть использован не один раз, а повторяемо, и после серии проходов должен сохранять возможность диагностики, коррекции и обслуживания.

Если эти условия выполнены, расширение оправдано. Если они не выполнены, расширение преждевременно: нужно не увеличивать длину структуры, а улучшать выпускную систему, фракцию, диагностику, защитную компоновку и коэффициент рабочего включения.

Варианты расширения после первого участка

Расширение может идти несколькими путями.

Первый путь — продольное расширение. В этом случае увеличивается длина участка за счёт добавления новых логических сегментов вдоль выбранного направления. Такой вариант полезен, если первый участок доказал стабильность продольного рабочего профиля и достаточную долговечность.

Второй путь — поперечное расширение. В этом случае увеличивается рабочий диаметр или улучшается поперечный профиль. Такой вариант полезен, если основной ограничитель первого участка оказался связан с узким окном входа или недостаточной шириной стабилизирующей зоны.

Третий путь — функциональное расширение. В этом случае участок не обязательно становится длиннее или шире, но получает разные режимы плотности, входные зоны, тормозные зоны, стабилизирующие зоны и области коррекции. Такой путь особенно важен для перехода от простого направленного участка к многофункциональной инфраструктурной среде.

Четвёртый путь — операционное расширение. В этом случае увеличивается не размер участка, а число аппаратов, способных им пользоваться, частота проходов, качество диагностики и скорость восстановления после проходов.

Для первого ограниченного сценария наиболее разумной является последовательность:

сначала доказать рабочий профиль;

затем доказать повторяемость проходов;

затем доказать обслуживание и восстановление;

после этого увеличивать длину, ширину или функциональность участка.

Почему расширение не должно опережать диагностику

Главная опасность инфраструктурного проекта — преждевременное масштабирование. Если участок расширяется до того, как подтверждены рабочее включение, долговечность, эрозионная цена и повторяемость проходов, масштабирование только увеличивает неопределённость.

В этом случае большая структура может оказаться не инфраструктурой, а большим объёмом плохо согласованного вещества. Поэтому расширение должно быть связано с диагностическим порогом.

Перед расширением необходимо ответить на несколько вопросов:

- какая доля вещества вошла в рабочий профиль;
- как быстро меняется плотность;
- сохраняется ли фракционный состав;
- насколько быстро растёт фазовый разброс;
- каков фактический эрозионный след на аппарате или тестовом модуле;
- сколько корректирующих проходов требуется после использования;
- можно ли повторить прохождение с близким результатом;
- сохраняется ли участок после серии проходов;
- не превышает ли срок формирования срок полезного сохранения структуры.

Только если ответы положительные, следующий этап становится инженерно оправданным.

Итоговая таблица сроков и сценариев

Сценарий	Основная схема	Нижняя оценка срока	Практический смысл
Один узкий распылитель	$D_{\text{release}} = 50$ м, последовательные полосы	~ 127 лет	непригодно для полного участка, допустимо только как локальный тест
10 узких распылителей	квазипараллельная работа при $D_{\text{release}} = 50$ м	~ 12,7 года	всё ещё слишком долго для первого рабочего участка
50 узких распылителей	групповая операция	~ 2,5 года	возможный нижний край крупного демонстрационного проекта
100 узких распылителей	плотная групповая операция	~ 1,27 года	практически значимый сценарий при хорошей диагностике
400 узких распылителей	одна полоса на аппарат	~ 116 суток	нижний кинематический

Сценарий	Основная схема	Нижняя оценка срока	Практический смысл
			предел, технически сложная синхронизация
Выпускная зона 500 м	около 40 полос	~ 12,7 года одним аппаратом; пропорционально меньше при группе	резко снижает число проходов; эффективна при групповой работе распылителей.
Выпускная зона 1 км	около 20 полос	~ 6,35 года одним аппаратом; месяцы/годы при группе	реалистичнее для распределённой системы
Выпускная зона 2 км	около 10 полос	~ 3,17 года одним аппаратом; около 116 суток при 10 аппаратах	перспективный вариант для развитой выпускной системы
Выпускная зона 5–20 км	от 4 до 1 полосы	от 1,27 года до 116 суток	требует очень крупной распределённой системы, не базовый первый вариант

Эта таблица показывает, что первый участок имеет несколько разных уровней реализуемости. В узком одиночном варианте он практически непригоден. В групповом варианте с десятками или сотней распылителей он становится крупным, но обсуждаемым проектом. В варианте с распределённой выпускной зоной срок резко сокращается, но возрастает сложность самой выпускной системы.

Итог главы

В настоящей главе показано, что срок формирования первого участка определяется не только массой рабочей фракции, а прежде всего геометрией выпуска, числом распылителей, качеством рабочего включения вещества и скоростью диагностики. Чистое время формирования при принятой целевой скорости рабочего вещества составляет около 116 суток, но это не срок создания всего участка, а лишь нижняя кинематическая оценка одного продольного формирующего прохода.

При базовой ширине выпускной зоны около 50 м полный рабочий диаметр требует порядка сотен продольных полос. Поэтому одиночный узкий распылитель приводит к чрезмерно долгому сроку, а практически значимыми становятся групповая работа распылителей и увеличение рабочей ширины выпускной зоны.

С учётом неполного рабочего включения требуемый запас подготовленной фракции может быть больше активной массы рабочего профиля, но это не меняет основного вывода: главным ограничителем остаётся геометрия формирования, параллельность работы распылителей и диагностика.

Основными параметрами чувствительности являются ширина выпускной зоны, число параллельных или квазипараллельных распылителей и коэффициент рабочего включения вещества. Именно они определяют, будет ли участок формироваться десятилетиями или может быть создан в пределах нескольких лет.

Критерий расширения состоит не в факте высвобождения заданной массы, а в подтверждении работоспособности сформированной среды. Участок должен быть создан быстрее, чем деградируют первые элементы профиля, сохранять плотность, фракционный состав, геометрию и кинематическую согласованность, обеспечивать повторяемое прохождение аппаратов и допускать диагностику, коррекцию и обслуживание. Только после подтверждения этих свойств участок приобретает инфраструктурный статус и может служить основанием для дальнейшего расширения.

30. Обслуживание, восстановление и первый срок эксплуатации участка

После формирования первого участка необходимо определить, когда он может считаться рабочим и каким образом его параметры должны поддерживаться в течение первого срока эксплуатации. Сам факт высвобождения вещества ещё не означает, что инфраструктурный участок создан. Рабочим он становится только тогда, когда после диагностики подтверждены его основные параметры: достаточная плотность, допустимая ширина рабочего профиля, фракционный состав, продольная направленность частиц, фазовая согласованность и безопасный режим взаимодействия с аппаратом.

Поэтому эксплуатация первого участка начинается не с момента распыления вещества, а с момента подтверждения рабочего профиля. До этого участок является формируемой областью. После подтверждения параметров он становится ограниченным инфраструктурным сегментом, который может использоваться для прохода аппаратов, проверки кинетического взаимодействия, оценки эрозионного воздействия, диагностики устойчивости профиля и подтверждения повторяемого эффекта.

Обслуживание как поддержание параметров среды

Обслуживание в данной постановке не следует понимать как ремонт твёрдой конструкции. Участок не является балкой, трубой или собранной станцией. Он представляет собой направленную дисперсную среду, поэтому обслуживанием является поддержание её параметров в рабочем диапазоне.

К таким параметрам относятся:

- фактическая плотность вещества в рабочей области;
- равномерность продольного и поперечного профиля;
- ширина выпускной зоны;
- сохранение размерного диапазона частиц;
- морфологическая однородность фракции;
- фазовая и векторная согласованность движения частиц;
- отсутствие зон опасной локальной концентрации;
- сохранение допустимого эрозионного режима для аппарата;

— измеримость участка после проходов аппаратов.

Контроль фактической ширины рабочего профиля особенно важен. В расчётах задаётся проектная ширина выпускной зоны и рабочий диаметр участка, но после распыления нужно проверить не расчётную, а реальную ширину полученного рабочего профиля. Если рабочий профиль оказался уже ожидаемого, между полосами могут возникнуть разрывы и зоны недонасыщения. Если он оказался слишком широким, часть вещества уходит в периферию, снижает коэффициент рабочего включения и может ухудшать фазовую согласованность. Поэтому контроль ширины рабочего профиля — это не отдельная геометрическая формальность, а проверка того, действительно ли вещество стало рабочей частью структуры.

Виды нарушений и способы восстановления

После формирования и первых проходов аппаратов участок может деградировать по разным причинам. Часть нарушений требует локального пополнения, часть — корректировки профиля, часть — учёта при следующих распылительных операциях.

Нарушение	Что означает	Обслуживающее действие
Снижение плотности	рабочий поток частиц становится слабее расчётного	локальное пополнение вещества
Рост плотности	локальный пик может повысить эрозионную и тепловую нагрузку, но в нижнем рабочем диапазоне не всегда является аварией	диагностический учёт, уменьшение подачи в соседних проходах, смещение профиля или локальное сглаживание
Сужение фактической ширины рабочего профиля	между полосами возникают зоны недонасыщения	дополнительный смещённый проход
Избыточное расширение рабочего профиля	часть вещества уходит в периферию и теряет рабочую функцию	корректировка соседних полос и снижение последующего расхода
Рост поперечного разброса частиц	след расплывается и теряет рабочий профиль	корректирующее распыление в центральной зоне
Потеря продольной направленности	частицы хуже согласованы с направлением движения аппарата	следующий проход с уточнённой ориентацией выпускной зоны или смещённое формирование нового согласованного рабочего профиля

Нарушение	Что означает	Обслуживающее действие
Ухудшение фракционного состава	появляются слишком мелкие, крупные или агломерированные частицы	исключение зоны из активного режима или последующее пополнение более чистой фракцией
Возмущение после прохождения аппарата	аппарат изменяет локальную концентрацию и профиль	диагностика после прохода и локальная коррекция

Рост плотности в первом практическом сценарии не должен автоматически рассматриваться как аварийное состояние. Поскольку участок формируется в нижнем рабочем диапазоне плотности, локальное увеличение концентрации даже на порядок может оставаться допустимым, если не выводит среду за пределы эрозионного, теплового и фазового режима. Поэтому первичной реакцией на локальное перенасыщение является не обход участка и не ожидание естественного рассеяния, а диагностический учёт такого отклонения.

В квазипараллельном режиме это отклонение может учитываться при последующих проходах: соседние полосы формируются с меньшей подачей, с небольшим смещением или с изменённым профилем, чтобы общий рабочий коридор оставался равномерным. Если локальный пик плотности мал и не влияет на прохождение аппарата, он может быть просто принят как допустимое неоднородное включение. Если же превышение создаёт риск для эрозии или нарушает фазовый профиль, оно должно компенсироваться не удалением вещества, а коррекцией последующих распылительных операций.

Таким образом, в первом участке зона повышенной плотности чаще является задачей учёта и коррекции, а не основанием для прекращения эксплуатации. Только если локальное перенасыщение превышает безопасный диапазон взаимодействия с аппаратом, такая зона временно исключается из активного профиля или компенсируется последующим формированием соседних полос.

Векторная коррекция на первом участке также не должна пониматься как точное управление каждой частицей. Речь идёт о коррекции следующими распылительными проходами. Если диагностика показывает, что часть рабочего профиля имеет неправильное направление движения частиц, следующий проход выполняется с уточнённой ориентацией выпускной зоны, изменённой фазой высвобождения или смещением линии распыления. Таким образом, исправляется не отдельная частица, а общий векторный режим локального участка. На первом этапе это наиболее реалистичная форма коррекции: не “перехватить” уже выпущенную пыль, а добавить или усилить правильный профиль рядом с ошибочной областью и тем самым восстановить рабочую функцию коридора.

Первый срок эксплуатации

Целевой срок эксплуатации первого участка в настоящей практической постановке принимается как порядок 10–30 лет. Этот срок не означает, что структура всё это время должна оставаться неизменной. Он означает, что в течение такого горизонта участок должен сохранять полезный инфраструктурный эффект: допускать проходы аппаратов, оставаться диагностируемым, сохранять рабочий профиль в допустимых пределах и требовать не полного повторного строительства, а обслуживания и локальной коррекции.

Такой срок зависит от качества начального формирования. Если вещество введено с малым фазовым разбросом, близкой к сферической и морфологически однородной фракцией, правильной рабочей шириной, достаточной плотностью и продольной направленностью, участок может дольше сохранять параметры. Если же формирование было грубым, с широким конусным выбросом, плохим коэффициентом рабочего включения и большим поперечным разбросом частиц, обслуживание потребуется значительно раньше.

Поэтому долговечность первого участка закладывается в момент формирования. Обслуживание может продлить срок работы, но оно не заменяет правильного начального задания среды. Если структура изначально сформирована как плохо согласованное облако, последующее обслуживание будет вынуждено исправлять уже возникшую деградацию. Если же структура сформирована как продольно-направленный и фазово согласованный рабочий профиль, обслуживание становится не постоянным ремонтом, а периодическим уточнением рабочего профиля.

Режимы восстановления

Для первого участка можно выделить три основных режима восстановления.

Первый режим — локальное пополнение. Он применяется, если в отдельной зоне плотность падает ниже рабочего уровня. В этом случае дополнительный распылительный проход добавляет недостающую фракцию в конкретную область, не перестраивая весь участок.

Второй режим — профильная коррекция. Он применяется, если структура сохраняет массу, но теряет форму: след становится слишком узким, слишком широким, смещённым или неоднородным. В этом случае корректируется не столько количество вещества, сколько его пространственное распределение.

Третий режим — локальное переформирование профиля. Он применяется, если отдельная зона потеряла фазовую или векторную согласованность сильнее, чем это можно исправить обычным смещённым проходом. В этом случае не обновляется весь участок и не перестраивается вся структура. Формируется дополнительный согласованный след, который восстанавливает рабочую функцию проблемной зоны или переводит активный профиль немного в сторону от неудачно сформированной области.

Для первого практического участка такой режим важнее, чем радикальное частичное обновление. Он соответствует самой логике квазипараллельного формирования: ошибка одного прохода не уничтожает участок, а становится исходными данными для следующего прохода.

Полное обновление всего участка не должно считаться нормальным режимом первого срока эксплуатации. Если полное обновление требуется слишком часто, это означает, что начальная схема формирования, выбор фракции, область размещения или режим прохождения аппаратов выбраны неверно.

Связь обслуживания с повторным использованием

Инфраструктурная ценность участка определяется подтверждением тех параметров, которые были заданы в расчётной постановке: рабочей плотности, продольной направленности, фазовой согласованности, допустимого эрозионного режима, диагностируемости и способности сохранять профиль в течение заданного эксплуатационного горизонта. Если эти параметры подтверждаются в экспериментальном участке либо остаются в пределах реально допустимого

отклонения от расчётной постановки, участок уже может выполнять инфраструктурную функцию в ограниченном орбитальном коридоре.

Повторное использование в этом случае является не отдельным предположением, а следствием подтверждённого рабочего режима. Чем меньше объём коррекции после прохождений аппаратов и чем дольше профиль остаётся в допустимых пределах, тем выше эксплуатационная ценность участка. Если же фактические параметры существенно расходятся с расчётными, это не отменяет настоящую постановку полностью, но требует уточнения теории, пересмотра фракции, режима распыления, плотности, ширины рабочего профиля или условий размещения на основе полученных данных.

Для первого участка не требуется сразу доказывать полноценную экономическую модель зрелой сети. Достаточно показать, что участок после формирования сохраняет рабочие параметры, допускает повторные прохождения и не требует полного обновления после каждого использования. Это уже будет означать переход от разового опыта к обслуживаемому инфраструктурному сегменту.

Сводные критерии проверки первого ограниченного сценария

Поскольку настоящая глава завершает практическую часть работы, далее необходимо не только описать обслуживание первого участка, но и свести вместе параметры, по которым весь первый ограниченный сценарий должен проверяться как единая система. Эти критерии относятся не только к эксплуатации, но ко всей Части III: выбору фракции, формированию участка, геометрии профиля, взаимодействию с аппаратом, сроку службы, обслуживанию и возможности дальнейшего расширения.

Поэтому следующий перечень следует понимать не как отдельную проверочную матрицу готовой миссии, а как итоговую рамку практической части. Он фиксирует, какие параметры первого участка должны быть подтверждены, чтобы расчётный сценарий мог перейти из постановочной модели в предметную инженерную проверку.

Первый участок во внутренней части главного пояса астероидов должен рассматриваться как минимальный, но рабочий элемент. Он не обязан сразу обеспечивать массовое движение и не должен быть протянут между планетами. Его задача — создать ограниченную направляющую среду, способную помогать аппарату, разгонно-направляющему блоку или защитно-стабилизирующему модулю выходить на более энергичную орбитальную конфигурацию с меньшими требованиями к точности и меньшей зависимостью от последующих активных коррекций.

Такой участок должен проверяться по нескольким группам критериев.

Первая группа — сырьевые и производственные критерии:

- возможность получения или предварительной подготовки рабочей фракции 50–70 мкм;
- возможность отделения мелкой, чрезмерно крупной и нежелательной фракции;
- возможность подготовки частиц с допустимой морфологией;
- возможность накопления и временного хранения вещества;
- возможность упаковки или иной формы подготовки вещества к транспортировке и дозированной подаче;
- возможность повторяемой подачи вещества в транспортно-дозировочный цикл.

Вторая группа — критерии формирования среды:

- достижение требуемой массовой плотности ρ_{dust} ;
- сохранение допустимого диапазона размеров d_p ;
- достижение требуемой длины участка L ;
- ограничение поперечного разброса структуры;
- сохранение фазовой и векторной согласованности частиц;
- возможность дозированного высвобождения вещества с контролируемым распределением;
- достижение приемлемого коэффициента рабочего включения η_{work} ;
- возможность измерения доли вещества, реально вошедшей в рабочий профиль.

Третья группа — критерии взаимодействия с аппаратом:

- воспроизводимость кинетико-аэродинамического воздействия;
- допустимость силовой нагрузки F_{dust} ;
- допустимость тепловой нагрузки P_{dust} ;
- допустимость эрозионной цены h_{erosion} ;
- возможность использования защитно-стабилизирующего модуля;
- повторяемость прохождения аппаратов сходного класса;
- подтверждение того, что прямой Δv_{dust} не подменяет основную двигательную функцию, а является одним из вкладов инфраструктурной среды.

Четвёртая группа — эксплуатационные критерии:

- срок сохранения рабочих параметров без обслуживания;
- срок сохранения рабочих параметров при обслуживании;
- возможность пополнения структуры;
- возможность коррекции распределения;
- число рабочих циклов производственно-логистического узла;
- соотношение между массой первоначального формирования и массой последующего обслуживания;
- выполнение условия $T_{\text{orb_disp}} \geq T_{\text{service}}$ для выбранной области или наличие компенсирующего режима обслуживания.

Пятая группа — инфраструктурные критерии:

- практический эффект участка при выходе на высокоэнергетическую траекторную конфигурацию;
- снижение требований к точности входа;
- снижение требований к активной коррекции;
- повышение повторяемости прохождения;
- возможность баллистического накопления результата после выхода из структуры;
- возможность последующего расширения участка;

- возможность включения участка в будущую сеть дисперсных структур;
- соответствие масштаба участка начальной эксплуатационной нагрузке.

Перечисленные критерии не завершают постановку первого сценария, а уточняют состав параметров, которые должны быть далее переведены в расчётную форму. На этом этапе важно не получить окончательный проект участка, а зафиксировать, какие величины должны быть оценены совместно: масса вещества, геометрия рабочего профиля, доля вещества, входящая в полезную область, число циклов формирования, производительность узла и режим последующего обслуживания.

Завершение практической части

В практической части был рассмотрен первый ограниченный сценарий формирования орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры. Были заданы масса участка, рабочая плотность, геометрия, орбитально-геометрическая постановка, схема распыления, целевая скорость рабочего вещества, рабочая ширина выпускной зоны, коэффициент рабочего включения, чувствительность к параметрам и первый эксплуатационный горизонт.

Полученная постановка показывает, что первый участок не является завершённой межпланетной трассой. Он является ограниченным, проверяемым и обслуживаемым инфраструктурным сегментом. Его задача состоит не только в проверке самой возможности создания направленной дисперсной среды, но и в подтверждении конкретных инфраструктурных параметров, заданных в настоящем расчётном сценарии: массы рабочей фракции, плотности, ширины рабочего профиля, фазовой согласованности, допустимой эрозионной нагрузки, срока сохранения профиля и повторяемости прохождения аппаратов.

При подтверждении этих параметров такой участок может сразу выполнять ограниченную инфраструктурную функцию в выбранном орбитальном коридоре. При частичном несовпадении расчёта и фактических данных он становится не тупиковым экспериментом, а источником уточнения постановки и корректировки параметров под реальные условия формирования и эксплуатации.

Таким образом, практическая часть работы показывает, что рассматриваемый первый практический сценарий может быть сведён к ограниченному инфраструктурному проекту вдали от Земли. Его трудность состоит не в запредельной массе вещества, а в точности подготовки фракции, синхронном или квазипараллельном распылении, диагностике, контроле эрозионного режима и поддержании фазовой согласованности.

Это позволяет осторожно рассматривать первый участок не только как научный эксперимент, но и как потенциально полезный инфраструктурный объект, экономическая целесообразность которого должна оцениваться после подтверждения расчётных параметров и фактического режима эксплуатации.

Часть IV. Итоги постановочной работы, границы настоящей версии и заключение

31. Основные результаты постановочной работы, границы настоящей версии и направления проверки

Настоящая глава фиксирует итоговый статус версии 1.2 как первого расчётно-критериального каркаса орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры. В настоящей версии исходная концепция переведена из уровня общей идеи в уровень постановочной инженерно-физической работы: определён объект исследования, описан его физический режим, задано место структуры в будущей архитектуре космического движения, введены расчётные критерии и сформирован первый ограниченный сценарий создания участка.

Работа показывает принципиальную реализуемость постановки как инженерно-физической задачи. Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура описана через конечный набор проверяемых параметров: целевую рабочую фракцию, плотность среды, длину свободного пробега, число Кнудсена, фазовую и векторную согласованность, кинетическое взаимодействие с аппаратом, эрозионную цену, защитно-стабилизирующую компоновку, деградацию, восстановление параметров, производственно-логистическую схему и практический сценарий формирования первого участка.

Главный результат настоящей версии состоит в том, что орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура определена не как метафорическая “пылевая дорога” и не как естественное облако вещества, а как искусственный внешний траекторный механизм. В этой постановке структура представляет собой заранее формируемую, измеряемую, обслуживаемую и частично восстанавливаемую дисперсную среду, способную изменять условия прохождения ограниченного участка траектории.

Потенциальное полезное действие структуры состоит в снижении коррекционной цены, расширении допустимого окна входа, стабилизации прохождения, уменьшении требований к точности наведения, повторном использовании подготовленного участка и переносе части сложности с каждого отдельного аппарата на внешнюю инфраструктурную среду. Прямой импульсный вклад при этом является только одним из элементов совокупного эффекта и не должен рассматриваться как единственный критерий полезности структуры.

По ключевым параметрам настоящая версия уже задаёт основу, на которой может быть проведена дальнейшая проверка. Она позволяет переходить от вопроса “может ли такая структура быть описана физически” к вопросу “какие параметры должны быть рассчитаны, проверены, уточнены и технологически подтверждены”. Тем самым версия 1.2 выполняет функцию первого формализованного уровня: она не завершает проект, а задаёт его проверяемый фундамент.

Основные результаты настоящей версии

В настоящей версии получены следующие результаты:

Во-первых, уточнён объект исследования. Вместо предварительного выражения “пылевая дорога” введено понятие орбитально-ориентированной протяжённой

дисперсной структуры. Это понятие фиксирует три ключевых свойства объекта: протяжённость, дисперсный состав и согласование с орбитальной динамикой.

Во-вторых, структура отделена от бортовых двигательных систем. Она не является двигателем аппарата, не находится на его борту и не создаёт весь эффект за счёт расхода его рабочего тела. Её корректное место — класс искусственных внешних траекторных механизмов, рядом с естественными внешними механизмами вроде гравитационных манёвров и аэродинамического торможения, но с иным физическим основанием.

В-третьих, задан физический режим рабочей среды. Дисперсная структура рассматривается как разреженная направленная среда, для которой существенны концентрация частиц, размерный диапазон, длина свободного пробега, число Кнудсена, фазовый разброс, векторная согласованность и относительная скорость взаимодействия с аппаратом.

В-четвёртых, введена кинетическая аэродинамика аппарата в направленной дисперсной среде. Под ней понимается не классическая аэродинамика сплошного газа, а взаимодействие аппарата с направленным статистическим потоком частиц. В работе заданы поток частиц на корпус, частота столкновений, импульсная нагрузка, интегральный импульс, тепловая нагрузка и связь этих параметров с эффективной площадью аппарата, относительной скоростью и длиной участка.

В-пятых, эрозия рассмотрена не как внешнее возмущение, а как внутренняя цена полезного действия структуры. Любое взаимодействие аппарата с дисперсной средой сопровождается механической, тепловой и эрозионной нагрузкой. Поэтому полезный эффект структуры должен оцениваться совместно с толщиной защитного слоя, допустимым повреждением, массой защитно-стабилизирующего модуля и сроком его эксплуатации.

В-шестых, структура связана с производственно-логистическим узлом. Показано, что рабочая среда не может быть создана простым выбросом вещества. Необходим цикл подготовки, фракционирования, накопления, упаковки, доставки, дозированного высвобождения, диагностики и корректирующих проходов.

В-седьмых, введён первый ограниченный расчётный сценарий. Он не является проектом полноценной межпланетной трассы. Его функция — проверить возможность формирования ограниченного участка направленной дисперсной среды с заданной плотностью, рабочей фракцией, шириной рабочего профиля, допустимой эрозионной ценой, сроком сохранения профиля и возможностью обслуживания.

В-восьмых, показано, что активная масса рабочего профиля в первом сценарии не обязана находиться в диапазоне мегатонн. При выбранных допущениях задача может обсуждаться в диапазоне десятков тонн рабочей фракции. При этом речь идёт именно об активной массе вещества, входящего в рабочий профиль структуры, а не о полной массе подготовленной и высвобождаемой фракции. Последняя зависит от коэффициентов рабочего включения вещества, корректирующих проходов, эксплуатационного резерва и других факторов формирования и обслуживания участка. Поэтому приведённая оценка не должна рассматриваться как окончательная масса инженерного проекта.

Граница между постановочной работой и проектом конкретной миссии

Настоящая работа задаёт предварительную инженерно-физическую постановку, необходимую для последующего проектирования конкретной миссии. Она определяет физический режим, параметры среды, технологические узлы и

проверочные критерии, без которых построение полноценного траекторного проекта было бы преждевременным.

Проект конкретной миссии должен включать выбор точной области размещения структуры, семейство орбит, фазовое окно, допустимые входные параметры аппарата, параметры выхода из структуры, длительность прохождения, профиль относительных скоростей, баллистическую дугу до и после участка, требования к навигации, допустимый разброс частиц, параметры защитно-стабилизирующего модуля и план обслуживания.

Версия 1.2 задаёт предшествующий уровень: класс объекта, физические режимы, ключевые критерии, массогабаритный порядок, технологическую цепочку и перечень критических неопределённостей. Именно на этой основе может быть построена последующая миссионная оптимизация.

Настоящая версия не доказывает эффективность конкретной миссионной архитектуры и не является проектом межпланетной транспортной системы. Её задача состоит в формировании расчётной и проверочной рамки, достаточной для перехода к лабораторным, численным и демонстрационным экспериментам.

Корректный следующий шаг состоит не в немедленном построении полной межпланетной трассы, а в последовательной проверке ограниченных элементов: расчётного участка, поведения дисперсной фракции, формирования рабочего профиля, диагностики профиля, устойчивости параметров и взаимодействия с типовым аппаратом.

Целевая рабочая фракция

В ранней постановке работы использовался расширенный размерный диапазон частиц порядка 10–100 мкм. Такой диапазон сохраняет значение как исследовательская рамка: он позволяет оценивать влияние размера частиц на радиационно-динамические, зарядовые, эрозионные, кинетические и технологические факторы. Однако для первого ограниченного рабочего сценария широкий диапазон недостаточен. Он создаёт слишком большую неопределённость по массе частицы, энергии единичного столкновения, отношению массы к площади сечения, фазовой устойчивости и эрозионной цене.

Поэтому в настоящей версии для первого расчётного сценария в качестве узкой рабочей области принимается диапазон $d_p \sim 50\text{--}70$ мкм.

Этот диапазон не утверждается как универсально оптимальный для всех будущих структур. Он используется как расчётная рамка, позволяющая ограничить число переменных и перейти от общей постановки к проверяемому инженерному сценарию. При изменении материала частиц, относительной скорости взаимодействия, защитной компоновки аппарата, допустимого эрозионного режима или области размещения структуры границы целевой фракции должны уточняться.

Проверке должен подлежать не широкий диапазон частиц сам по себе, а конкретная рабочая фракция, обеспечивающая приемлемое сочетание долговечности, управляемости, импульсного воздействия, эрозионной безопасности, технологической подготавливаемости и устойчивости рабочего профиля. Поэтому размер 50–70 мкм следует понимать не как окончательный ответ, а как первый расчётный выбор, вокруг которого должна строиться дальнейшая лабораторная и численная проверка.

Предельным технологическим идеалом является не просто попадание частиц в заданный размерный интервал, а формирование морфологически однородной рабочей фракции: частицы близкого размера, близкой формы, близкого состава,

близкой плотности и, по возможности, близкой внутренней структуры. Такая однородность снижает разброс взаимодействия с аппаратом, упрощает расчёт потока, уменьшает неопределённость эрозионной нагрузки, повышает предсказуемость кинетического воздействия и увеличивает вероятность высокого коэффициента рабочего включения вещества.

Поэтому в дальнейшем анализе следует различать три уровня:

Первый уровень — широкий исследовательский диапазон порядка 10–100 мкм, используемый для оценки чувствительности модели к размеру частиц.

Второй уровень — узкий расчётный диапазон первого ограниченного сценария, принимаемый в настоящей версии как $d_p \sim 50\text{--}70$ мкм.

Третий уровень — экспериментально подтверждённая целевая рабочая фракция, в которой уточнены не только размер частиц, но и материал, форма, плотность, монолитность, допустимый разброс массы, отношение массы к площади сечения и характер взаимодействия с защитной поверхностью аппарата.

Такое разделение снижает избыточность дальнейшей проверки. Нет необходимости одинаково подробно проверять все возможные фракции широкого диапазона, если первый расчётный сценарий ориентируется на более узкую область. Главная задача следующего этапа состоит в том, чтобы проверить, действительно ли фракция порядка 50–70 мкм обеспечивает приемлемый баланс между импульсным воздействием, управляемостью среды, долговечностью профиля и допустимой эрозионной ценой.

TRL-статус ключевых элементов концепции

С учётом текущего уровня проработки настоящая работа в целом относится к ранней стадии технологической готовности. Однако это не означает, что все её элементы находятся на одинаково низком уровне. Часть подсистем опирается на зрелые или частично зрелые технологии: анализ пыли, защита от микрочастиц, датчики, космическая доставка, промышленные методы фракционирования порошков. Низкий TRL возникает прежде всего на уровне объединения этих элементов в новый класс инфраструктуры: протяжённую, направленную, обслуживаемую дисперсную среду с заданным профилем.

Таблица предварительной оценки технологической готовности ключевых подсистем орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры.

Подсистема	Ориентировочный TRL	Технологическая опора	Ограничение для настоящей работы
Анализ пыли и микрочастиц	6–9	Cassini, Stardust, Hayabusa, OSIRIS-REx, датчики пыли и анализ возвращённых образцов	Анализ микрочастиц реализован, но не в режиме искусственного протяжённого коридора
Защита от микрочастиц	5–8	Whipple Shield, защита МКС, защита космических аппаратов от микрометеороидов и орбитального мусора	Защита известна, но длительное направленное прохождение через расчётную дисперсную

Подсистема	Ориентировочный TRL	Технологическая опора	Ограничение для настоящей работы
			среду требует отдельной модели
Подготовка и фракционирование вещества	4–7	Промышленное фракционирование порошков, ситовые, аэродинамические, электростатические и иные методы разделения	Перенос в микрогравитацию, вакуум, зарядовую среду и условия малых тел не доказан
Доставка и контейнеризация	4–6	Существующие грузовые миссии, контейнерные системы, малые аппараты, операции доставки полезной нагрузки	Доставка к зоне формирования структуры требует отдельной архитектуры и экономического обоснования
Дозированный выпуск дисперсной фракции	2–4	Отдельные элементы подачи, дозирования, раскрытия контейнеров и выброса вещества существуют	Нет комплексной системы направленного выпуска рабочей пылевой фракции с заданным фазовым профилем
Распределённая зона выпуска	1–3	Концептуальная схема, частичная аналогия с распределёнными аппаратами и групповыми миссиями	Требуется демонстрация формирования протяжённого рабочего профиля, а не локального облака
Диагностика профиля структуры	2–4	Лидары, оптические датчики, датчики пыли, навигационные измерения, методы анализа рассеяния	Нет готовой схемы измерения плотности, фазового разброса и векторной согласованности всего коридора
Добыча вещества малых тел	1–3	Hayabusa, Hayabusa2, OSIRIS-REx как демонстрации отбора и возврата проб	Промышленная добыча, переработка и подготовка вещества в нужных объёмах не реализованы
Автономное обслуживание участка	1–3	Элементы автономных космических миссий, коррекции орбит, инспекционные аппараты	Нет реализованных систем обслуживания протяжённой дисперсной структуры такого масштаба
Интегрированная орбитально-	1–2	Совокупность перечисленных	Не существует демонстрации полного

Подсистема	Ориентировочный TRL	Технологическая опора	Ограничение для настоящей работы
ориентированная дисперсная структура		элементов и расчётная постановка настоящей работы	цикла: подготовка — выпуск — диагностика — коррекция — повторное использование

Из этой таблицы следует, что слабым местом концепции является не отсутствие технологических аналогов вообще, а разрыв между существующими частными технологиями и их объединением в обслуживаемую инфраструктурную среду. Анализ пыли, защита, доставка, датчики и фракционирование имеют внешние технологические опоры. Но формирование протяжённого направленного коридора, удержание рабочего профиля, диагностика и обслуживание такой структуры остаются ранними задачами.

Критические параметры дальнейшей проверки

Дальнейшая проверка концепции должна быть сосредоточена на нескольких параметрах, от которых зависит переход от расчётно-критериального каркаса к проектной модели. Первый участок не должен оцениваться как замена двигателя или гравитационного манёвра. Его проверочный смысл состоит в другом: способен ли подготовленный дисперсный участок снизить требования к прохождению выбранного режима, уменьшить коррекционную и стабилизационную нагрузку, расширить допустимое окно входа и сохранить повторяемую функцию после серии аппаратов.

Первый параметр — прямой импульсный вклад структуры. Введённые формулы позволяют рассчитать интегральный импульс и изменение скорости аппарата, однако в первом ограниченном сценарии этот вклад может оказаться умеренным. Поэтому структура должна оцениваться не как замена двигателя, а как внешний инфраструктурный участок, который может снижать часть цены выбранного режима движения, расширять допустимое окно входа, уменьшать требования к коррекциям и создавать эффект на серии аппаратов.

Для первого ограниченного сценария особенно важно не смешивать прямой импульсный вклад с совокупным инфраструктурным эффектом. Прямой Δv_{dust} может оказаться малым и сам по себе не обязан оправдывать формирование участка. Поэтому проверяться должна не только величина Δv_{dust} , но и то, снижает ли участок коррекционную цену, расширяет ли окно входа, повышает ли повторяемость прохождения, создаёт ли стабилизирующий эффект и сохраняет ли полезный результат на последующей баллистической дуге.

Второй параметр — коэффициенты рабочего включения вещества. В настоящей версии необходимо различать η_{spray} и η_{work} . Коэффициент η_{spray} характеризует качество формирования: какая доля высвобождённой массы действительно вошла в рабочий профиль участка. Коэффициент η_{work} относится уже к эксплуатации: какая доля вещества сохраняет рабочее состояние после формирования, прохождений аппаратов и начальной деградации профиля. Поэтому расчётная масса 31–62 т должна пониматься как активная масса рабочего профиля, а не как окончательная масса всей операции. Полная масса подготовленной и высвобождаемой фракции зависит от η_{spray} , η_{work} , корректирующих проходов и эксплуатационного резерва.

Третий параметр — выбор целевой фракции. Расширенный диапазон 10–100 мкм полезен как исследовательская рамка, однако первый ограниченный сценарий в настоящей версии ориентирован на узкий расчётный диапазон порядка 50–70 мкм. В дальнейшем необходимо уточнять не только диапазон, но и целевой размер, допустимый разброс, форму, состав и монолитность частиц.

Четвёртый параметр — стабилизирующий момент. В работе показано, что направленная дисперсная среда потенциально может создавать стабилизирующее воздействие на аппарат или защитно-стабилизирующий модуль. Однако этот эффект должен быть сопоставлен с возмущающими моментами от солнечного давления, неоднородности потока, ошибок входа и собственных динамических характеристик аппарата. Без такого сравнения стабилизация остаётся возможной функцией, но не доказанным преимуществом.

Пятый параметр — долговременная орбитальная согласованность структуры. В работе учтены Пойнтинг–Робертсоновское торможение, зарядовые эффекты и общая деградация профиля, однако для выбранной зоны необходимо отдельно рассчитать дифференциальную прецессию и время потери фазовой согласованности. Именно этот параметр определяет, как часто потребуется обслуживание участка.

Шестой параметр — экономическая модель. Настоящая версия задаёт физическую и технологическую основу для будущего расчёта, но полная модель капитальных затрат, операционных затрат, окупаемости, числа проходов, цены обслуживания и сравнения с альтернативными транспортными архитектурами должна быть построена отдельно.

Седьмой параметр — масштаб первого рабочего сценария. Сценарий во внутренней части главного пояса астероидов требует сочетания нескольких технологически незрелых направлений: локальной ресурсной базы, подготовки вещества, многоразовой логистики, фракционирования, дозированного распыления, диагностики и обслуживания профиля. Поэтому он должен рассматриваться как дальний рабочий сценарий, к которому ведут промежуточные лабораторные, численные и демонстрационные проверки.

Экономическая граница настоящей версии

Экономический смысл орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры в перспективе связан с переходом от постоянной земной доставки ключевых компонентов к возрастающей локализации производства, вещества, обслуживания и транспортных операций. Чем больше элементов инфраструктуры создаётся, пополняется и обслуживается за счёт локальных ресурсов, тем ниже относительная зависимость системы от подъёма массы с Земли и тем выше потенциал дальнейшего расширения.

В такой логике структура является не только средством повторного использования одного участка, а элементом возможного инфраструктурного цикла. Локальная добыча вещества, локальная подготовка рабочей фракции, локальное обслуживание профиля и локальная транспортная логистика могут постепенно формировать контур самоусиления: уже созданная инфраструктура облегчает создание следующей инфраструктуры, снижает относительные затраты на последующие операции и расширяет допустимый масштаб деятельности.

Масштабирование в такой модели не является простым внешним преимуществом. Оно становится следствием инфраструктурного цикла. Если каждая следующая операция всё меньше зависит от доставки с Земли и всё больше опирается на уже

созданную локальную базу, то рост системы может сопровождаться снижением относительной стоимости единицы операции. Именно этот переход от земно-зависимой логистики к частичной локализации и является главным экономическим основанием дальнейшей проверки концепции.

Повторное использование участка, распределение капитальной стоимости между серией аппаратов, снижение числа коррекций, расширение допустимых окон входа и уменьшение требований к точности наведения являются важными вторичными эффектами этой логики. Они усиливают экономический смысл структуры, но не исчерпывают его. Главная перспектива состоит в том, что внешний дисперсный участок может стать частью более широкой локальной производственно-транспортной системы.

Версия 1.2 создаёт основу для последующего экономического расчёта: в ней выделены параметры, от которых зависит будущая модель затрат и эффекта. Для следующего этапа потребуется оценить капитальные затраты на производственно-логистический узел, стоимость подготовки вещества, срок службы участка, частоту обслуживания, число аппаратов, использующих структуру, и степень замещения земной доставки локальными операциями.

Горизонт реализации и различие между демонстрацией и рабочим сценарием

С учётом текущего уровня технологической готовности первый полноценный рабочий сценарий должен рассматриваться как дальняя инженерная цель, а не как ближайшая прикладная программа. Он требует решения нескольких задач, которые сегодня находятся на ранних стадиях: орбитального фракционирования целевой дисперсной фракции, удержания и дозированной подачи вещества, формирования протяжённого направленного рабочего профиля, диагностики профиля, обслуживания участка, локальной ресурсной базы и многоразовой логистики в области малых тел.

Для предотвращения смешения разных масштабов необходимо жёстко различать три уровня развития концепции: предварительный околоземный или лабораторно-орбитальный эксперимент, первый рабочий участок во внутренней части главного пояса астероидов и развитую сеть дисперсных инфраструктурных участков. Эти уровни не должны оцениваться по одним и тем же критериям: первый проверяет физику и технологию формирования, второй — ограниченную инфраструктурную функцию, третий — транспортную систему.

В этой логике можно выделить три последовательных уровня:

Первый уровень — лабораторная и численная проверка. На этом уровне проверяются расчёты столкновений, эрозии, тепловой нагрузки, стабилизирующих моментов, поведения целевой фракции порядка 50-70 мкм, дозированной подачи и методов диагностики.

Второй уровень — малая демонстрационная миссия. Её задача не в создании полезной инфраструктуры, а в проверке способности сформировать ограниченный направленный дисперсный рабочий профиль, оценить коэффициенты рабочего включения и подтвердить возможность коррекции параметров.

Третий уровень — первый рабочий сценарий во внутренней части главного пояса астероидов. Он требует уже не отдельного опыта, а производственно-логистической цепочки, способной готовить вещество, доставлять его к зоне высвобождения, формировать участок, диагностировать профиль и обслуживать его.

Именно третий уровень относится к дальнему технологическому горизонту. При современных темпах развития космической промышленности его реализация может относиться к периоду нескольких десятилетий, а не к ближайшим годам. Это не отменяет ценности постановочной работы, но требует честного разграничения между концепцией, экспериментом и рабочей инфраструктурой.

Первый ограниченный сценарий выбран не потому, что он обеспечивает максимальный эффект, а потому, что он позволяет проверить наибольшее число критических параметров при минимальном масштабе инфраструктуры. Его значение состоит в том, что на ограниченном участке можно совместно проверить фракцию, выпуск, рабочее включение вещества, диагностику профиля, эрозионную цену, стабилизирующий эффект, долговечность и возможность обслуживания.

Направления дальнейшей проверки

Следующая версия работы должна быть направлена не на расширение общей концепции, а на количественное закрытие наиболее опасных неопределённостей.

Минимальный проверочный пакет следующей версии должен включать не расширение общей концепции, а проверку ограниченного набора наиболее опасных параметров: лабораторную рабочую фракцию порядка 50–70 мкм, ударные и эрозионные тесты, измерение прямого импульсного вклада Δv_{dust} , оценку коэффициента рабочего включения распылённого вещества η_{spray} , расчёт стабилизирующего момента M_{stab} , диагностику фактического профиля и проверку того, сохраняется ли сформированная среда в рабочем состоянии после возмущения.

Первое направление — численный расчёт прямого импульсного вклада для нескольких сценариев плотности, длины участка, площади взаимодействия, массы аппарата и относительной скорости. Такой расчёт должен показать, в каких режимах структура даёт только малый коррекционный вклад, а в каких может иметь более заметное значение.

Второе направление — модель совокупного инфраструктурного эффекта. Необходимо оценить не только прямое изменение скорости, но и выигрыш от расширения окна входа, снижения числа коррекций, уменьшения требований к точности, повторного использования участка и распределения стоимости структуры на серию аппаратов.

Третье направление — коэффициенты рабочего включения вещества. Необходимо отдельно исследовать коэффициент рабочего включения при формировании η_{spray} и коэффициент рабочего включения при эксплуатации η_{work} . Следует показать, как изменение этих параметров влияет на активную массу рабочего профиля, полную массу подготовленной и высвобождаемой фракции, число корректирующих проходов, срок формирования, срок эксплуатации и общую стоимость участка. Особый интерес представляет определение диапазонов η_{spray} и η_{work} , при которых первый ограниченный сценарий сохраняет практический смысл без перехода к чрезмерным массам вещества и частоте обслуживания.

Четвёртое направление — уточнение целевой фракции. Необходимо проверить, действительно ли диапазон 50–70 мкм обеспечивает оптимальный баланс между импульсным воздействием, устойчивостью профиля, эрозионной безопасностью и технологичностью формирования, а также определить допустимый разброс размера, формы, состава и монолитности частиц.

Пятое направление — технологическая карта TRL. Для каждой ключевой подсистемы необходимо указать текущий уровень готовности, технологическую

опору, ограничение для настоящей работы и эксперимент, который переводит её на следующий уровень.

Шестое направление — расчёт баланса стабилизирующего и возмущающего моментов. Для выбранной типовой компоновки аппарата необходимо сравнить момент от дисперсного потока с моментами от солнечного давления, неоднородности среды, ошибок ориентации и внутренних систем аппарата.

Седьмое направление — расчёт дифференциальной прецессии для выбранной области 2,3–2,5 а.е. Этот расчёт должен показать, как долго профиль участка сохраняет фазовую согласованность без обслуживания и как часто требуются корректирующие проходы.

Восьмое направление — минимальная экспериментальная миссия. Следует отделить полноценный рабочий сценарий от предварительного опыта. Минимальная миссия может проверять не инфраструктурную полезность сразу, а только способность сформировать направленный дисперсный след, измерить его профиль и подтвердить коэффициенты рабочего включения.

Итог главы

Настоящая версия переводит концепцию орбитально-ориентированных протяжённых дисперсных структур из уровня общей идеи в уровень постановочной инженерно-физической работы с первым расчётно-критериальным сценарием. В ней определён объект исследования, задан физический режим среды, введена кинетическая аэродинамика аппарата в направленной дисперсной среде, рассмотрена эрозионная цена, описан производственно-логистический узел и предложен первый ограниченный сценарий формирования, диагностики и обслуживания участка.

Главный результат версии 1.2 состоит не в доказательстве готовности такой инфраструктуры, а в формировании проверяемой рамки. Первый участок описан через конечный набор физических, геометрических, массовых, технологических и эксплуатационных параметров: рабочую фракцию, плотность, длину, ширину профиля, коэффициенты рабочего включения, эрозионную цену, срок формирования, срок деградации и режим обслуживания.

Дальнейшая судьба концепции должна определяться не декларативным расширением идеи, а проверкой критических параметров: прямого Δv_{dust} , совокупного коррекционно-стабилизационного эффекта, η_{spray} , η_{work} , баланса стабилизирующих и возмущающих моментов, дифференциальной прецессии, долговечности профиля и экономической модели. Если эти параметры подтвердятся в допустимых пределах, первый участок может рассматриваться как начальный инфраструктурный сегмент. Если нет, настоящая работа всё равно задаёт строгую рамку для проверки границ применимости направленных дисперсных сред в межпланетном движении.

32. Заключение

В настоящей работе рассматривается возможность создания искусственной дисперсной инфраструктурной среды для движения космических аппаратов. Под такой средой понимается не естественное пылевое облако и не пассивная область повышенной запылённости, а орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура с заданными параметрами вещества и движения частиц. Её

назначение состоит не в замене двигательных установок, баллистической навигации, гравитационных манёвров или активного управления аппаратом, а в создании обслуживаемого участка движения, где часть требований к аппарату и траектории может быть перенесена на заранее подготовленную внешнюю среду.

Исходная постановка работы состоит в том, что масштабирование космических полётов не может быть сведено только к совершенствованию отдельных аппаратов и способов разгона. При переходе от единичных миссий к более регулярному движению возникает вопрос о внешней инфраструктурной среде, способной участвовать в организации траектории, стабилизации, коррекции и повторяемости прохождения. Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура рассматривается в этой работе именно как такой возможный инфраструктурный элемент.

При этом результат настоящей работы не следует понимать как доказательство готовности такой инфраструктуры к реализации. В настоящей версии получен другой, более ограниченный результат: концепция может быть сведена к системе проверяемых физических, геометрических, технологических и эксплуатационных параметров. Тем самым она переходит из области общей идеи в область постановочной инженерно-физической задачи.

Особенно важно, что первый участок не должен оцениваться как “пылевой двигатель” или как замена гравитационного манёвра. Прямой импульсный вклад дисперсной среды может быть малым по сравнению с полным межпланетным Δv миссии. Поэтому полезность структуры должна оцениваться не только через Δv_{dust} , а через совокупный инфраструктурный эффект: снижение коррекционной цены, расширение окна входа, стабилизацию прохождения, баллистическое накопление малой коррекции, повторяемость использования и возможность обслуживания участка.

Теоретическая часть работы показала, что дисперсная среда может рассматриваться как инфраструктурный объект только при наличии проектно заданных параметров. Естественная межпланетная пыль, зодиакальные облака, пылевые полосы и следы малых тел сами по себе не образуют инфраструктуру движения, поскольку их состав, плотность, размерный диапазон, фазовый разброс и орбитальные параметры не согласованы с требованиями конкретного аппарата. Инфраструктурное значение возникает только тогда, когда дисперсность, протяжённость, плотность и фазовая холодность структуры, то есть малый внутренний разброс скоростей частиц, становятся управляемыми характеристиками.

Поэтому орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура в настоящей работе понимается не как облако вещества, а как организованная среда с расчётным режимом взаимодействия. Её физический смысл состоит в создании такого диапазона параметров, при котором среда уже не является почти пустым пространством с редкими случайными столкновениями, но ещё не превращается в чрезмерно плотный и разрушительный поток. В этом промежуточном режиме появляется возможность рассматривать дисперсную структуру как внешнюю среду движения, обладающую воспроизводимым кинетическим воздействием.

Отдельное значение имеет рассмотрение взаимодействия аппарата со структурой. В работе показано, что поток частиц не может рассматриваться только как риск повреждения и не может рассматриваться только как полезное воздействие. Эти стороны неразделимы: импульсная передача, стабилизация, тепловая нагрузка и эрозионная цена являются частями одного режима. Поэтому полезное действие

структуры возможно только в связанной системе “дисперсная среда — аппарат — защитно-стабилизирующий модуль”. Аппарат в такой постановке не просто проходит через пылевую область, а взаимодействует с заранее заданной средой, для которой должны быть ограничены размер частиц, энергия единичного столкновения, плотность, фазовый разброс и допустимый эрозионный режим.

Производственно-технологическая часть работы показала, что формирование такой структуры не может быть сведено к разовому выбросу вещества. Для создания рабочей среды необходим организованный цикл получения, подготовки, накопления, упаковки, доставки и дозированного высвобождения фракции. Производственно-логистический узел в этой логике является не внешним дополнением, а частью самой инфраструктурной постановки: без него структура не может быть ни создана в расчётном виде, ни обслуживаться в течение эксплуатационного срока.

При этом первый ограниченный участок не обязан сразу зависеть от полной зрелой астероидной промышленности. Локальная добыча и переработка вещества важны для последующего масштабирования, но первый практический сценарий может опираться на заранее подготовленную фракцию, доставленную с Земли или подготовленную в контролируемых условиях. Это снижает неопределённость первого этапа и позволяет рассматривать начальный участок не как результат сразу всей будущей космической индустрии, а как ограниченный инженерный сценарий с проверяемыми параметрами.

Практическая часть работы показала, что первый участок может быть ограниченным по масштабу, но рабочим по функции. Он не должен сразу представлять собой развитую межпланетную сеть: его значение состоит в том, что уже на ограниченном участке можно проверить и использовать инфраструктурный режим взаимодействия аппарата с заранее подготовленной средой. В рассмотренной постановке такой участок не требует мегатонн вещества активного вещества в рабочем профиле. Речь идёт о десятках тонн активной массы рабочего профиля и о более широком диапазоне подготовленного вещества с учётом потерь, эффективности включения и технологического резерва. Такой порядок массы не делает сценарий простым, но переводит его из области неопределённой мегаструктуры в область крупного, но обсуждаемого инфраструктурного проекта.

Главный результат практической части состоит в том, что первый участок может быть рассмотрен как рабочий инфраструктурный сегмент. Его назначение не сводится только к проверке факта существования дисперсной среды. При подтверждении заданных параметров такой участок способен выполнять полезную функцию в выбранном орбитальном коридоре: брать на себя часть требований к движению аппарата, облегчать переход к высокоэнергетической орбитальной конфигурации, снижать коррекционную нагрузку, поддерживать повторяемый режим прохождения и сохранять рабочее состояние в течение значимого эксплуатационного горизонта.

При этом полезность такого участка определяется не только величиной прямого импульсного вклада. Она должна оцениваться через совокупность эффектов: снижение коррекционной цены, расширение допустимого окна входа, стабилизацию прохождения, баллистическое накопление результата после выхода из структуры и возможность повторного использования подготовленного участка. Именно в этом смысле структура рассматривается как искусственный внешний траекторный механизм, а не как разновидность слабой двигательной установки.

Тем самым первая реализация орбитально-ориентированной протяжённой дисперсной структуры может быть ограниченной, но уже рабочей. Она не обязана сразу представлять собой развитую сеть или полную межпланетную транспортную систему. Её достаточное значение на первом этапе состоит в том, что она подтверждает возможность вынесения части функций движения во внешнюю инфраструктурную среду и показывает, что эта среда может быть сформирована, диагностирована, обслужена и использована повторно.

Настоящая работа не подменяет собой проект конкретной миссии, траекторную оптимизацию, лабораторную программу по эрозии, плазменно-динамическую модель, расчёт отказов распылителей или технико-экономическое обоснование. Эти уровни должны следовать после проверки уже введённых параметров. В настоящей версии задана исходная расчётно-критериальная основа, без которой последующие миссионные, экспериментальные и экономические расчёты не имели бы предмета.

Одновременно настоящая версия уже задаёт объект, расчётный сценарий, систему критериев проверки, оценку технологической готовности отдельных подсистем и перечень ключевых направлений дальнейшей валидации.

Общий вывод работы состоит в том, что идея искусственной дисперсной инфраструктурной среды может быть переведена из предварительной метафоры в расчётно-критериальную инженерную постановку. Орбитально-ориентированная протяжённая дисперсная структура не рассматривается как замена двигателю, баллистике, гравитационным манёврам или активному управлению аппаратом. Её смысл состоит в создании внешнего обслуживаемого участка движения, в котором часть требований к аппарату и траектории переносится на заранее подготовленную среду.

Дальнейшая судьба концепции должна определяться не расширением общей идеи, а проверкой критических параметров: рабочей фракции, плотности, фазовой согласованности, прямого импульсного вклада, эрозионной цены, коэффициентов рабочего включения, долговечности профиля, стабилизирующего эффекта, режима обслуживания и экономической целесообразности.

Если эти параметры подтвердятся в допустимых пределах, орбитально-ориентированные протяжённые дисперсные структуры могут рассматриваться как новый класс космической инфраструктуры: ограниченный на первом этапе, но способный выполнять реальную функцию в организации движения космических аппаратов. Если же часть параметров окажется недостижимой, настоящая работа всё равно задаёт строгую рамку для проверки границ применимости направленных дисперсных сред в межпланетном движении.

Приложение А. Список использованных источников

1. Analysis of IRAS Solar System Dust Data. NASA Technical Reports Server (NTRS), 1994.
2. The Size–Frequency Distribution of the Zodiacal Cloud: Evidence from the Solar System Dust Bands.
3. A Study of Extended Zodiacal Structures. NASA Technical Reports Server (NTRS), 1991.
4. Distribution of Interplanetary Dust Detected by the Juno Spacecraft and Its Contribution to the Zodiacal Light.
5. Interplanetary Dust Particles Collected from the Stratosphere. George J. Flynn.
6. Origins and Dynamics of Interplanetary Dust Particles. NASA Technical Reports Server (NTRS).
7. Radiation Forces on Small Particles in the Solar System. Burns J. A., Lamy P. L., Soter S. Icarus, 1979.
8. Gustafson B.A.S. Physics of Zodiacal Dust // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1994. Vol. 22. P. 553–595.
9. Murray C.D., Dermott S.F. Solar System Dynamics. Cambridge University Press, 1999
10. Sykes M. V., Walker R. G. Cometary Dust Trails (Пылевые следы комет).. Icarus. 1992. Vol. 95. No. 1. P. 180–210.
11. Dawn at Vesta Press Kit. NASA / Jet Propulsion Laboratory.
12. NASA In-Situ Resource Utilization (ISRU) Overview.
13. OSIRIS-REx Mission to Asteroid Bennu. National Aeronautics and Space Administration (NASA).
14. Burdanov A. et al. Discovery and Characterization of a Decameter Main-Belt Asteroid. Nature, 2025.

Приложение Б. Словарь обозначений и параметров

Б.1. Латинские обозначения

Обозначение	Пояснение
A_{eff}	Эффективная площадь взаимодействия аппарата с дисперсной средой
a_{dust}	Ускорение аппарата под действием потока дисперсных частиц
C_{build}	стоимость создания и первоначального развёртывания участка структуры (капитальные затраты)
C_p	Эффективный коэффициент передачи импульса при столкновении частицы с поверхностью
$C_{service}$	Условная стоимость обслуживания участка структуры за расчётный срок
D	Диаметр рабочего поперечного сечения участка структуры
D_a	Характерный размер аппарата (для расчёта числа Кнудсена Kn_a)
D_{log}	Диаметр логического участка (расчётный поперечный масштаб)
$D_{release}$	Рабочая ширина выпускной зоны распылителя
D_{total}	суммарная деградация рабочего профиля структуры
d_p	Характерный диаметр частицы дисперсной среды
E_{diss}	энергия, поглощённая деформацией, разрушением, внутренним нагревом или скольжением частицы;
F_{allow}	допустимая механическая нагрузка на аппарат или на его рабочий защитный элемент в данном режиме движения.
F_{dust}	Суммарная импульсная сила, действующая на аппарат со стороны дисперсной среды
F_{thrust}	доступная тяга аппарата
h_{allow}	Допустимый расход толщины защитного слоя за один проход или за заданное число проходов
$h_{erosion}$	Расчётная глубина эрозии (повреждения) защитного слоя за проход

Обозначение	Пояснение
H_s	Толщина рабочего слоя структуры (характерный вертикальный масштаб, для Kn_s)
h_{shield}	Толщина защитного слоя аппарата
$I_{mission}$	Инфраструктурный выигрыш (снижение затрат) на одну миссию при использовании структуры
J_{dust}	Интегральный импульс, переданный дисперсной средой аппарату за проход
K_{corr}	Коэффициент увеличения срока формирования на коррекционные проходы
K_{diag}	Коэффициент увеличения срока формирования на диагностику
K_{local}	Отношение локально добытой массы к доставленной с Земли
Kn	Число Кнудсена — отношение длины свободного пробега к характерному размеру
Kn_a	Число Кнудсена по характерному размеру аппарата
Kn_s	Число Кнудсена по толщине рабочего слоя структуры
K_{pack}	Коэффициент упаковки (отношение массы упаковки к массе рабочей фракции)
$K_{profile}$	Отношение массы рабочего профиля структуры к доставленной с Земли массе
$K_{reserve}$	Коэффициент резервирования массы или срока формирования
L	Длина участка структуры
L_{1000}	Длина логического участка структуры порядка 1000 км; расчётный масштаб
L_c	характерный размер аппарата, относительно которого оценивается степень разреженности среды (в общей формуле числа Кнудсена)
L_{log}	Длина одного логического участка (расчётный продольный сегмент)
L_{spray}	Длина продольного следа, формируемого за один цикл подачи распылителем

Обозначение	Пояснение
l_{eff}	Эффективное плечо стабилизирующего момента
$M_{1000,theory}$	Теоретическая масса вещества в участке длиной 1000 км
$M_{1M,theory}$	Теоретическая масса вещества в участке длиной 1 000 000 км
M_{app}	Масса аппарата
$M_{carrier,profile}$	Масса вещества от одного аппарата, которая после высвобождения фактически входит в рабочий профиль структуры за один цикл
$M_{carrier,release}$	Масса вещества, высвобождаемого одним носителем за цикл
$M_{ctrl,0}$	характерный управляющий момент, необходимый аппарату в отсутствие стабилизирующего влияния дисперсной среды, где индекс 0 указывает на базовый режим движения аппарата без учёта стабилизирующего воздействия структуры
$M_{form,release}$	Масса вещества, необходимая для первоначального формирования участка
M_{log}	Масса вещества в одном логическом участке
M_{need}	Общий объём подготовленной рабочей фракции, необходимый для формирования и обслуживания участка (формирование + обслуживание + резерв)
M_{pack}	Масса упаковки или контейнера для рабочей фракции
$M_{payload}$	Масса полезного груза (рабочей фракции) одного носителя
$M_{portion}$	Суммарная масса одной порции (рабочая фракция + упаковка)
$M_{processed}$	Масса вещества, прошедшего переработку
$M_{profile}$	Масса вещества, реально вошедшего в рабочий профиль структуры
$M_{profile,cycle}$	Масса рабочего профиля, формируемого за один операционный цикл
$M_{project}$	Суммарная масса проекта (земная + локальная составляющие)
M_{raw}	масса исходного сырья, поступившего на переработку

Обозначение	Пояснение
$M_{\text{raw,total}}$	Суммарная масса исходного вещества, необходимая для всего участка
M_{ready}	Масса подготовленной рабочей фракции после фракционирования и сортировки
M_{release}	Масса вещества, высвобождённого в пространство
$M_{\text{release,cycle}}$	Масса вещества, высвобождаемого за один операционный цикл
$M_{\text{release,total}}$	Суммарная масса высвобождённого вещества для формирования участка
M_{reserve}	Резервная масса вещества на случай отклонений и коррекций
M_{segment}	Масса вещества в одном поперечном сегменте участка
$M_{\text{service,profile}}$	Масса вещества рабочего профиля, требуемая для одного цикла обслуживания
$M_{\text{service,release}}$	Масса вещества, высвобождаемого при обслуживании
M_{stab}	Стабилизирующий момент, создаваемый дисперсной средой на аппарат
$M_{\text{strip,log}}$	Масса вещества одной продольной полосы в пределах одного логического участка
$M_{\text{strip,total}}$	Масса вещества одной продольной полосы по всей длине участка
M_{struct}	Суммарная масса вещества рабочего профиля структуры
$M_{\text{struct,opt}}$	Оптимальная расчётная масса рабочего профиля структуры
$M_{\text{total,opt}}$	Полный запас подготовленной рабочей фракции, учитывающий формирование участка, корректирующие операции и начальное обслуживание
M_{work}	Масса вещества, реально включившегося в рабочий режим
$\dot{m}_{\text{dust}}$	Массовый поток дисперсных частиц через эффективную площадь аппарата
$\dot{M}_{\text{feed}}$	Массовый расход подачи вещества в расчётную область за цикл
m_A	Масса вещества, прошедшая через единицу площади аппарата

Обозначение	Пояснение
m_{dust}	Масса частиц, прошедших через эффективную площадь аппарата за время прохода
m_p	Масса одной дисперсной частицы
N	Число частиц в рассматриваемом объёме
N_{break}	Ориентировочное число использований участка для инфраструктурной окупаемости
N_{carrier}	Число носителей, задействованных в операционном цикле
N_{cycle}	Число операционных циклов для формирования полного участка
$N_{\text{group,cycle}}$	Число групповых циклов при параллельной работе нескольких носителей
N_{log}	Число логических участков в полной длине структуры
N_{segment}	Число поперечных сегментов по длине участка
N_{width}	Число продольных полос по ширине рабочего сечения
n	Числовая концентрация частиц (число частиц в единице объёма)
$Q_{\text{effective}}$	Эффективный темп подачи подготовленной рабочей фракции
Q_{prepare}	Темп получения и подготовки рабочей фракции
Q_{pr}	Коэффициент эффективности взаимодействия частицы с солнечным излучением (в формуле β)
Q_{release}	Темп дозированного высвобождения подготовленной фракции в расчётную область
Q_{work}	Темп поступления вещества в рабочий профиль
r	Радиус рабочего поперечного сечения участка структуры
r_{log}	Радиус логического участка
r_p	Радиус одной дисперсной частицы
$S_{\mu\text{m}}$	Размер частицы в микрометрах (в формуле коэффициента β)
T_{feed}	Время подачи вещества за один цикл высвобождения

Обозначение	Пояснение
$T_{\text{feed,total}}$	Суммарное время подачи вещества для формирования всего участка
$T_{\text{form, clean}}$	Чистое расчётное время формирования участка без поправочных коэффициентов
$T_{\text{form, total}}$	Полное расчётное время формирования участка с учётом всех коэффициентов
T_h	Время гомановского перехода на сравниваемой траектории
$T_{\text{high, effective}}$	Эффективное время высокоэнергетического перехода (с учётом потерь)
$T_{\text{high, stable}}$	Стабильное время высокоэнергетического перехода
$T_{\text{orb_disp}}$	Характерное время орбитального рассогласования частиц структуры
T_{pass}	Время прохождения аппарата через участок структуры
T_{prepare}	Время подготовки требуемой массы рабочей фракции
T_{release}	Время высвобождения одной порции вещества
$T_{\text{service_first}}$	Расчётный срок до первого существенного обслуживания структуры
$T_{\text{service_life}}$	Расчётный срок эксплуатации участка структуры (целевой: 10–30 лет)
T_{strip}	Время формирования одной продольной полосы
t_{after}	Время свободного баллистического движения аппарата после выхода из структуры
V	Объём рассматриваемой области
V_{1000}	Объём логического участка длиной 1000 км
V_{active}	Объём активной рабочей зоны участка структуры
V_{log}	Объём одного логического участка
V_p	Объём одной дисперсной частицы
V_{stock}	Объём хранилища подготовленного вещества

Обозначение	Пояснение
$V_{rel,a}$	Относительная скорость аппарата и частиц дисперсной среды
$V_{rel,p}$	Относительная скорость взаимных столкновений частиц друг с другом
V_{spray}	Продольная скорость распылителя вдоль формируемого участка
$V_{work,target}$	Целевая продольная скорость высвобождаемого рабочего вещества
$k_{service}$	Коэффициент, задающий долю массы структуры, восстанавливаемую за один цикл обслуживания

Б.2. Греческие обозначения

Обозначение	Пояснение
β	Отношение силы радиационного давления к силе солнечного тяготения (критерий Пойнтинга–Робертсона)
Δv	Изменение скорости аппарата (общее обозначение)
Δv_{allow}	Допустимое изменение скорости аппарата за проход
$\Delta v_{brake,saved}$	Эквивалентная экономия топлива на торможение за счёт структуры
$\Delta v_{corr,saved}$	Экономия скорости на коррекциях траектории при использовании структуры
Δv_{dust}	Изменение скорости аппарата под прямым воздействием дисперсной среды
$\Delta v_{equiv,stab}$	Эквивалентный вклад стабилизирующего эффекта структуры в скоростной бюджет
Δv_{extra}	Дополнительная скорость, требуемая для высокоэнергетической траектории без структуры
$\Delta v_{extra,with}$	Дополнительная скорость, требуемая для высокоэнергетической траектории со структурой
Δv_{high}	Скорость для выхода на высокоэнергетическую траекторию без структуры
$\Delta v_{high,with}$	Скорость для выхода на высокоэнергетическую траекторию со структурой

Обозначение	Пояснение
Δv_{low}	Скорость гомановского (экономичного) перехода
$\Delta v_{particle}$	Изменение скорости отдельной частицы при столкновении
Δv_{perp}	Поперечная составляющая изменения скорости аппарата
Δv_{saved}	Суммарная экономия скорости при использовании структуры
$\Delta \omega$	Разность скоростей орбитальной прецессии частиц; определяет время рассогласования T_{orb_disp}
Δx_{perp}	Поперечное смещение аппарата, накопленное за время свободного движения после выхода из структуры
ΔX	Обобщённое отклонение параметра (в критериях устойчивости)
ΔX_{allow}	Допустимое значение обобщённого отклонения параметра
$\eta_{delivery}$	Коэффициент доставки (доля вещества, достигшей расчётной зоны высвобождения)
η_{frac}	Коэффициент фракционирования (доля рабочей фракции в исходном веществе)
η_{morph}	Коэффициент морфологической пригодности частиц рабочей фракции
η_{pack}	Коэффициент упаковки (доля вещества, сохранившегося при упаковке и транспортировке)
η_{size}	Минимально допустимая доля частиц рабочей фракции, попадающих в расчётный диапазон размеров;
η_{spray}	Коэффициент рабочего включения вещества (доля высвобождённого вещества, вошедшая в рабочий профиль)
η_{stab}	Коэффициент стабилизирующего воздействия среды
η_{work}	Коэффициент рабочего включения вещества
$\eta_{work,service}$	Коэффициент рабочего включения при обслуживании структуры.
λ	Средняя длина свободного пробега частицы в дисперсной среде
ν_a	Частота ударов частиц среды об аппарат

Обозначение	Пояснение
V_{coll}	Частота взаимных столкновений частиц дисперсной среды между собой
ρ_{bulk}	Насыпная или эффективная плотность подготовленного вещества.
ρ_{dust}	Массовая плотность дисперсной среды
$\rho_{\text{dust,opt}}$	Оптимальная рабочая плотность дисперсной среды
$\rho_{\text{dust,theory}}$	Теоретический диапазон плотности дисперсной среды
ρ_{mat}	Плотность материала частицы
ρ_{max}	Верхняя граница рабочего диапазона плотности дисперсной среды
ρ_{min}	Нижняя граница рабочего диапазона плотности дисперсной среды
ρ_{shield}	Плотность материала защитного слоя аппарата
σ	Эффективное поперечное сечение столкновения частицы (в формуле длины свободного пробега)
σ_{perp}	Поперечный разброс скоростей частиц (мера фазовой холодности структуры)
T_{coll}	Характерное время между взаимными столкновениями частиц дисперсной среды
T_{deg}	Характерное время деградации рабочих параметров структуры
T_{grav}	Характерное время гравитационного рассеяния структуры
T_{nat}	Характерное время жизни природной пылевой структуры (аналог для сравнения)
T_{plasma}	Характерное время деградации структуры, определяемое зарядовыми и плазменными процессами
T_{rad}	Характерное время радиационной деградации (Пойнтинг–Робертсон и световое давление)
Φ_p	Поток частиц на единицу площади
χ_{diss}	эффективный коэффициент диссипации

Контакты и обсуждение

Автор открыт к профессиональному обсуждению, вопросам и критике в рамках заявленной концепции.

E-mail: serhiom@mail.ru

Project community / updates: <https://vk.com/roadsss>