

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВОК ЦЕНТРОБЕЖНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

(ЧАСТЬ 03 МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ: НА ОСНОВЕ ОПЫТА РАБОТЫ НА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ УСТАНОВКЕ РУТ (МИИТ))

Зайцев А.А.

26 января 2019 г.

Аннотация: В данном препринте, третьем по порядку в серии работ, раскрывающих технологию применения установок центробежного моделирования для решения геотехнических задач приводятся данные составляющие методику моделирования, в т.ч. рекомендуемые масштабы моделирования и определяющие параметры обобщенные на основе опыта работы на установке центробежного моделирования РУТ (МИИТ) в первую очередь д.т.н., профессора Яковлевой Т.Г., инженера Иванова Д.И. и других специалистов. Подготовлен на основе рукописи [1]

Ключевые слова: транспорт, инфраструктура транспорта, физическое моделирование, установки центробежного моделирования, натура, прототип, модель, технологии, история, centrifuge modelling, строительство, геотехника, земляное полотно, контрольно-измерительные системы, compact vision, машинное зрение, моделирование устойчивости откосов, моделирование насыпей, рабочая зона земляного полотна,

3.1. Рекомендуемые масштабы моделирования и моделируемые процессы

Для моделирования работы геотехнических объектов в поле центробежных сил используются прототипы – уменьшенные модели этих сооружений. Размеры этих моделей, масштаб их изготовления зависит от поставленной задачи исследования, технических характеристик центрифуги, формы и размеров кареток, в которых устраиваются модели.

Каретки центробежной машины РУТ (МИИТ) имеют стандартные размеры: длина (по длине модели) 0.40 м, ширина 0.90 м, высота 0.50 м.

В связи с этим, при моделировании различных геотехнических сооружений в соответствии с их натурными размерами необходимо соблюдать требуемые масштабы моделирования.

Выделим пять основных схем размещения модельных сооружений в соответствии с рисунком 3.1:

- 1) для моделей рабочей зоны земляного полотна железных дорог ;
- 2) для моделей насыпей железных и автомобильных дорог, дамб различного назначения и плотин;
- 3) для моделей усиленных насыпей;

4) для моделей выемок железных и автомобильных дорог – в соответствии с рис.2.4;

5) для моделей откосов каналов бортов карьеров и неустойчивых склонов.

На рисунках и в последующем тексте индекс «м» относится к модельным параметрам, индекс «н» – к натурным. Длины модели и натуральных сооружений обозначены L_M и L_N (м); значения $L_M = \text{const} = 0.40$ м. Крутизна откосов и склонов 1:m моделируется в натурном масштабе.

Любые геометрические параметры l (м) модельных и натуральных сооружений принимаются в соотношении

$$l_M = \frac{l_N}{n} \quad (3.1)$$

где l_M и l_N – любой линейный размер модельного и натурального сооружения.
 n – масштаб моделирования.

На рисунках 3.1 – 3.4 приведены рекомендуемые масштабы моделирования, при которых модели сооружений должны свободно размещаться в каретке центробежной машины РУТ (МИИТ) [1].

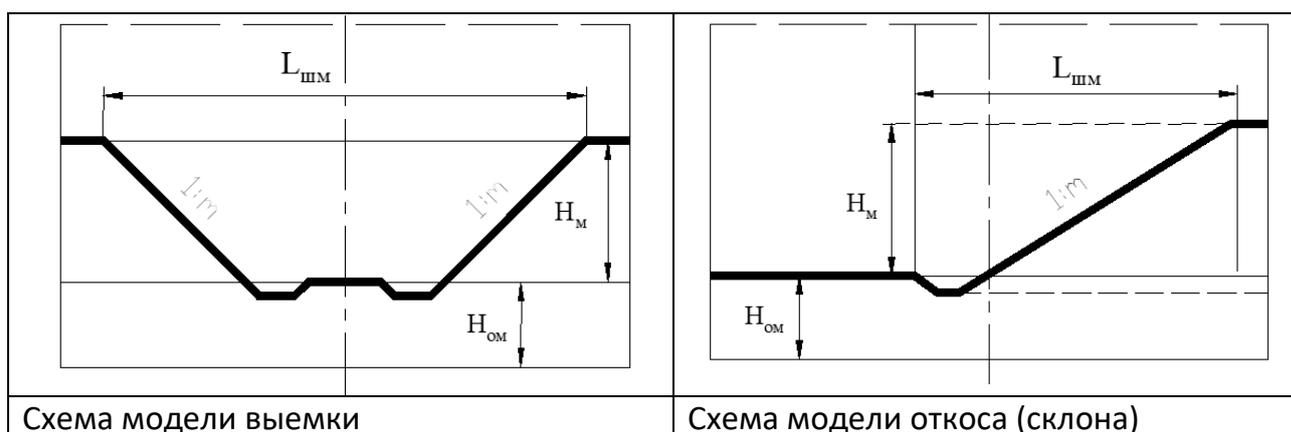


Рисунок 3.1 – Схемы моделирования выемки откоса (склона)

В таблице 3.1 приведены предельно возможные масштабы моделирования, при которых еще возможно разместить модель в каретке тех размеров, которые им соответствуют. При меньших размерах сооружений и приведенных величинах n , модели будут размещаться в каретках более свободно. При расчетах модельных геометрических параметров величины m принимались приближенно от 1:1.5 до 1:2. Если будут моделироваться геотехнические объекты большей высоты или при $m > 2$, то при $n = 300$ их модели может моделироваться только половина сооружения (или часть его), но при этом не должно быть $H_n > 120$ м, так как при $n = 300$ $H_m = 0.40$ м, что является предельным значением [1].

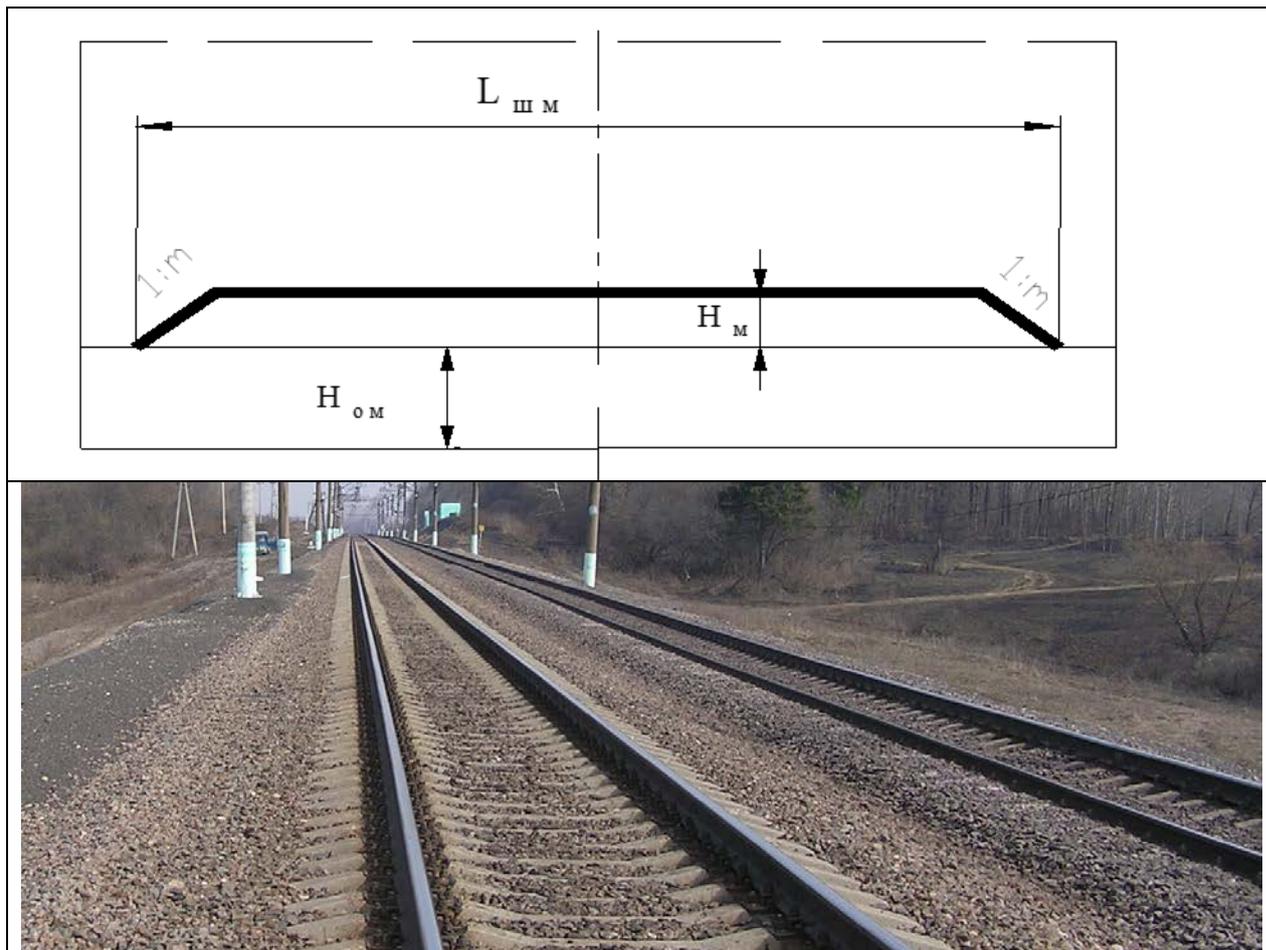


Схема и фотография рабочей зоны земляного полотна

Рекомендуемые масштабы моделирования геометрических параметров

№ № п/п	Наименование сооружения	Рекомендуемы й масштаб моделировани	Размеры геометрических параметров, м натура / модель			
			<i>H</i>	<i>H₀</i>	<i>L_ш</i>	<i>L</i>
1.	Рабочая зона земляного полотна железных дорог	20	$\frac{2.0}{0.10}$	$\frac{2.0}{0.10}$	$\frac{18.0}{0.90}$	$\frac{8.0}{0.40}$

Рисунок 3.2 - Схема, фотография и рекомендуемые масштабы моделирования рабочей зоны земляного полотна

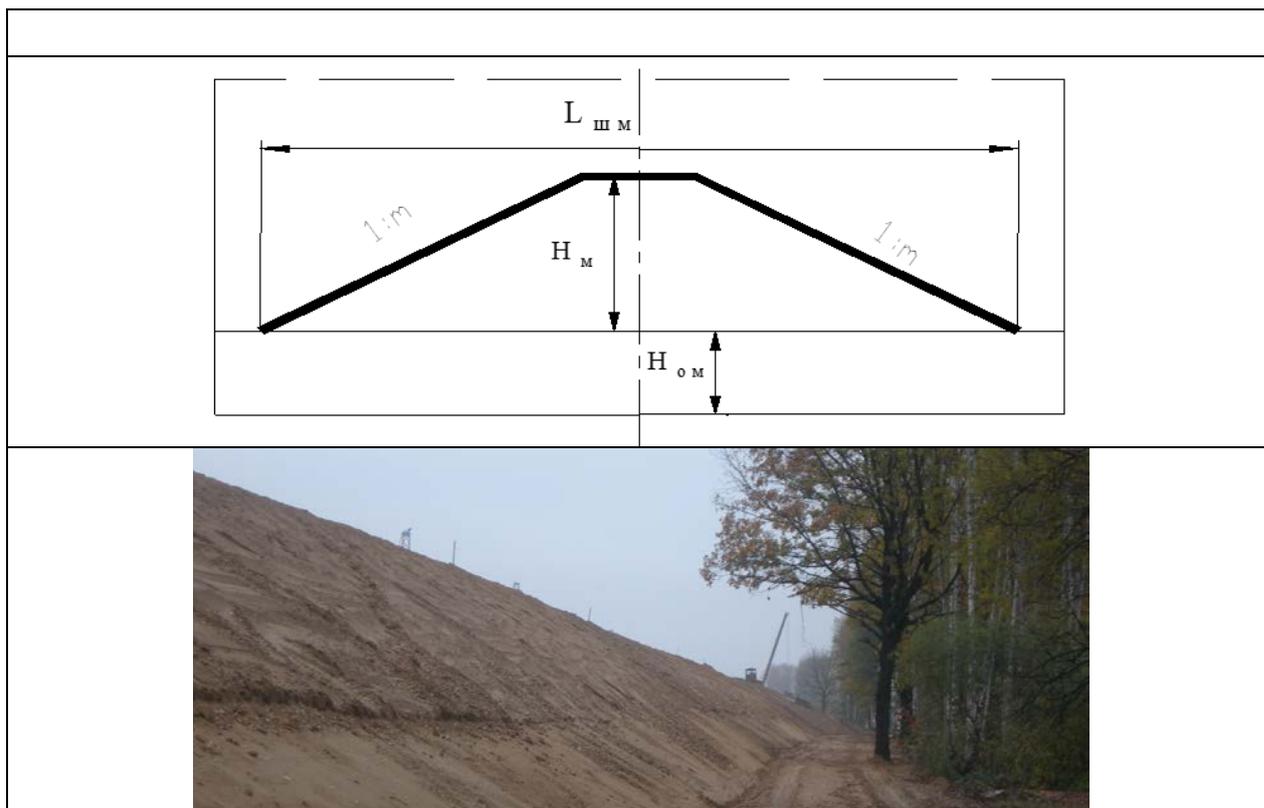
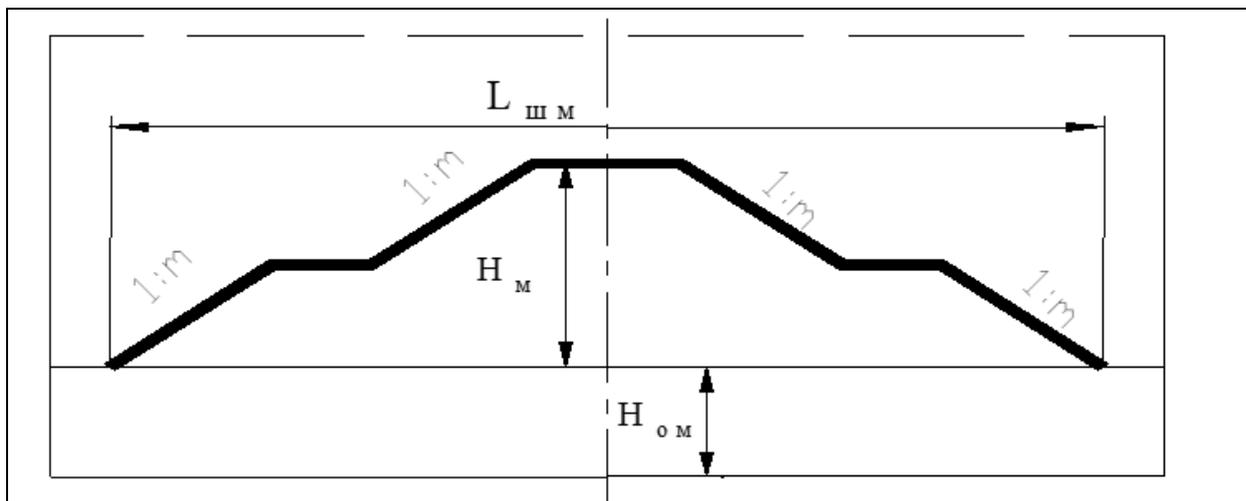


Схема железнодорожной насыпи и фотография откоса насыпи

Рекомендуемые масштабы моделирования геометрических параметров

№№ п/п	Наименование сооружения	Рекомендуемый масштаб моделирования n	Размеры геометрических параметров, м натура / модель			
			H	H ₀	L _ш	L
2.	Насыпи и выемки железных и автомобильных дорог, дамбы	50	$\frac{10.0}{0.20}$	$\frac{10.0}{0.20}$	$\frac{45.0}{0.90}$	$\frac{20.0}{0.40}$
		75	$\frac{15.0}{0.20}$	$\frac{10.0}{0.13}$	$\frac{67.5}{0.90}$	$\frac{30.0}{0.40}$
		100	$\frac{20.0}{0.20}$	$\frac{10.0}{0.10}$	$\frac{90.0}{0.90}$	$\frac{40.0}{0.40}$
		125	$\frac{31.25}{0.25}$	$\frac{12.5}{0.10}$	$\frac{74.5}{0.60}$	$\frac{50.0}{0.40}$
		150	$\frac{45.0}{0.30}$	$\frac{15.0}{0.10}$	$\frac{132.0}{0.88}$	$\frac{60.0}{0.40}$

Рисунок 3.3 - Схема, фотография и рекомендуемые масштабы моделирования железнодорожной насыпи



Фотография насыпи усиленной контрбанкетом



Фотография насыпи с усилением габионными конструкциями

№№ п/п	Наименование сооружения	Рекомендуемый масштаб моделирования <i>n</i>	Размеры геометрических параметров, м натура / модель			
			<i>H</i>	<i>H_о</i>	<i>L_ш</i>	<i>L</i>
1	2	3	4	5	6	7
3.	Насыпи на прочном основании, усиленные бермами или др. сооружениями	100	$\frac{16.0}{0.16}$	$\frac{20.0}{0.10}$	$\frac{88.0}{0.88}$	$\frac{40.0}{0.40}$
		150	$\frac{24.0}{0.16}$	$\frac{15.0}{0.10}$	$\frac{132.0}{0.88}$	$\frac{60.0}{0.40}$
		200	$\frac{30.0}{0.15}$	$\frac{20.0}{0.10}$	$\frac{156.0}{0.78}$	$\frac{80.0}{0.40}$

Рисунок 3.4 - Схема, фотография и рекомендуемые масштабы моделирования железнодорожной насыпи с конструкцией усиления

Таблица 3.1 Рекомендуемые масштабы моделирования геометрических параметров

№№ п/п	Наименование сооружения	Рекомендуемый масштаб моделирования n	Размеры геометрических параметров, м натура / модель			
			H	H_0	L_{III}	L
1	2	3	4	5	6	7
1.	Откосы каналов, бортов карьеров, неустойчивые склоны	100	30.0	10.0	60.0	40.0
			0.30	0.10	0.60	0.40
		150	45.0	15.0	90.0	60.0
			0.30	0.10	0.60	0.40
		200	60.0	20.0	120.0	80.0
0.30	0.10		0.60	0.40		
250	75.0	25.0	150.0	100.0		
0.30	0.10	0.60	0.40			
2.	Плотины	200	70.0	20.0	180.0	80.0
			0.35	0.10	0.90	0.40
		250	87.5	25.0	225.0	100.0
			0.35	0.10	0.90	0.40
		300	105.0	30.0	270.0	120.0
0.35	0.10		0.90	0.40		
3.	Насыпи на слабых основаниях, усиленные бермами	100	6.0	10.0	86.0	40.0
			0.06	0.10	0.86	0.40

Процессы в геотехнических сооружениях

При центробежном моделировании различных геотехнических сооружений при подготовке эксперимента и обработке результатов моделирования следует уметь правильно устанавливать определяющие процессы и определяющие параметры, описывающие эти процессы, которые необходимы для интерпретации полученных результатов.

При этом следует помнить, что в поле центробежных сил многие параметры меняют свои значения, то есть между любым параметром натурального сооружения A_n и модели A_m существует связь вида [6].

$$A_m = A_n/nA ,$$

где n_A - масштабный коэффициент, который выражается через масштаб моделирования n , представляющий собой отношение напряженности модельного поля к ускорению силы тяжести, он совпадает с геометрическим масштабом.

Из опыта и теории центробежного моделирования, можно выделить следующие определяющие параметры и соответствующие им масштабные коэффициенты, приведенные в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Определяющие параметры для физического моделирования

№	Наименование параметра A	Обозначение	Единица измерения	Масштаб моделирования n_A
1	2	3	4	5
1.	Геометрический размер Расстояние Разность координат Линейное перемещение	L S, h	м м	n n
2.	Площадь	F	м^2	n^2
3.	Объем	V	м^3	n^3
4.	Плоский угол Угловое перемещение	α ε	радиан радиан	1 1
5.	Момент сопротивления	W_c	м^3	n^3
6.	Момент инерции	I_u	м^4	n^4
7.	Ускорение силы тяжести	g	$\text{м}/\text{с}^2$	$1/n$
8.	Масса	m	кг	n^3
9.	Плотность массы	ρ	$\text{кг}/\text{м}^3$	1
10.	Сила, вес	P	Н ($\text{кг}/\text{м}/\text{с}^2$)	n^2
11.	Распределенная линейная нагрузка	q	Н/м ($\text{кг}/\text{с}^2$)	n
12.	Распределенная поверхностная нагрузка (удельное давление на поверхности слоя)	p	Па ($\text{кг}/\text{м}/\text{с}^2$)	1
13.	Напряжение (механическое)	σ, τ	Па ($\text{кг}/\text{м}/\text{с}^2$)	1
14.	Пределы текучести, упругости. Временное сопротивление растяжению, разрыву, сжатию	R_o	Па ($\text{кг}/\text{м}/\text{с}^2$)	1

продолжение таблицы 3.2 (1)

1	2	3	4	5
15.	Модуль деформации, упругости, сдвига	E	Па (кг/ м с ²)	1
16.	Удельный вес грунта	γ	Н/м ³ (кг/с ² м ²)	1/ n
17.	Удельный вес сухого грунта	γ_d	Н/м ³ (кг/с ² м ²)	1/ n
18.	Удельный вес частиц грунта	γ_s	Н/м ³ (кг/с ² м ²)	1/ n
19.	Пористость	n_o	-	1
20.	Коэффициент пористости	e	-	1
21.	Коэффициент сжимаемости	a	Па ⁻¹ (м с ² /кг)	1
22.	Влажность	w	-	1
23.	Сопротивление сдвигу	τ_o	Па (кг/ м с ²)	1
24.	Угол внутреннего трения	φ	радиан	1
25.	Удельное сцепление	c	Па (кг/ м с ²)	1
26.	Коэффициент постели упругого основания	C_o	Н/м ³ (кг/ м ² с ²)	1/ n
27.	Динамическая вязкость	η	Па с (кг/ м с)	1
28.	Кинетическая вязкость	ν	м ² /с	1
29.	Поверхностное натяжение воды	σ_v	Н/м (кг/с ²)	1
30.	Коэффициент фильтрации	K_f	м/с	1/ n
31.	Коэффициент консолидации	C_k	м ² /с	1
32.	Коэффициент проницаемости	K	м ²	1
33.	Скорость фильтрации	v_f	м/с	1/ n
34.	Гидравлический градиент	\mathcal{J}	-	1
35.	Уровень воды в бьефе	H_H	м	n
36.	Напор	H	м	n
37.	Высота капиллярного поднятия	$\alpha_{кап}$	м	n
38.	Давление в воде	p_v	кПа	1
39.	Объемный расход грунтовой воды	Q	м ³ /с	n
40.	Теплопроводность	λ	Вт/м град (м кг/с ³ град)	1
41.	Удельная теплопроводность	C_m	Дж/кг град (м ² /с ² град)	1
42.	Температуропроводность	α^2	м ² /с	1
43.	Температура	T	градус	1
44.	Воздействие поездной нагрузки: амплитуда частота	A f	м Гц	1 1
45.	Коэффициент устойчивости	K	-	1
46.	Коэффициент стабильности	K_o	-	1
47.	Коэффициент деформируемости	R	м ² /с	1/ n

Продолжение таблица 3.2 (2)

1	2	3	4	5
48.	Показатель деформируемости	D	-	1
49.	Время: при движении механической системы, ударе, моделировании упругих систем, взрыва; при фильтрации, движении оползней, капиллярном поднятии воды, тепловом подобии; при выжимании значительного количества воздуха из грунта	t		n n^2 1

Если при исследовании требуется установить величину масштаба моделирования n_d для какого-либо из параметров, не приведенных в таблице 3.2, то следует иметь в виду, что при центробежном моделировании модель выполняется из натурального материала и на нее действует модельное поле сил, имеющее перегрузку в размере ng .

При планировании эксперимента на центрифуге важную роль играет правильное выделение определяющего процесса и группировка для него определяющих параметров, что дает возможность правильно разработать критерии подобия и получить экспериментально уравнения связи между параметрами.

Рекомендуется из всех процессов, изучаемых на центрифуге выделить в качестве определяющих, процессы, указанные в таблице 3.3, которым соответствует набор определяющих параметров (см. таблицу 3.2).

Таблица 3.3 - Определяющие процессы

№№	Наименование процесса	Определяющие параметры A
1.	Осадка	$S, \gamma, \sigma, L, \alpha$
2.	Консолидация, ползучесть	p, C_k, t, L, S, η
3.	Выпор	$p, \sigma, \tau, \tau_o, L, \eta, K_o$
4.	Сдвиг, срез, скольжение	p, γ, L, τ_o, K
5.	Усадка, набухание, пучение	$p, \gamma, L, h, \lambda, \alpha^2, t, grad T$
6.	Фильтрация	$p, \gamma, L, K, n_o, K_\phi, H_n, Q, \alpha_{кап}, \mathfrak{J}$
7.	Провал	$p, \gamma, L, \tau_o, \sigma, \tau$
8.	Деформативность объекта в целом	$D, p, \gamma, L, \tau_o, \nu_\phi$ и др.

При выделении того или иного определяющего процесса в качестве определяющих параметров вместо одного параметра, можно использовать несколько параметров, связанных с определяющим параметром, исходя из удобства получения их в опыте (например, вместо удельного веса грунта γ использовать удельный вес сухого грунта γ_d и влажность w , вместо касательного напряжения τ_o - угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c и т.д.).

3.2 Контрольно-измерительная аппаратура. Контролируемые - измеряемые параметры. Подготовка моделей

3.2.1. Назначение и область применения

Контрольно-измерительная система регистрации параметров моделирования предназначена для контроля и измерения различных параметров при моделировании геотехнических сооружений (в том числе земляного полотна железных дорог) на центробежной установке РУТ (МИИТ) на основе использования компьютерных технологий.

Контролируемые и измеряемые параметры центробежной установки можно разделить на три группы:

- параметры, измеряющие и контролирующие показатели работы центробежной машины;

- параметры, контролирующие и измеряющие показатели отдельных узлов машины и внешних относительно модели геотехнического сооружения процессов;

- параметры, контролирующие и измеряющие показатели моделируемого процесса, фиксируемые непосредственно в самой модели.

К **первой** группе относятся: скорость вращения машины N (об/мин); скорость вращения горизонтального вала N_2 (об/мин); время работы машины, полное и отдельных частей опыта t (мин); номинальная мощность W (кВт); напряжение V (вольт) и сила тока генератора J (ампер).

Назначение первой группы параметров – обеспечение заданных в опыте режимов работы центрифуги: разгона, стационарного и торможения.

Ко **второй** группе относятся: вес модели G (кг); - вес каретки с моделью $G_{км}$ (кг); углы разворота кареток β (град); уровни воды в каретках H (мм); переходные сопротивления в токосъемнике R (Ом); параметры нагрузочного устройства: сила P (Н), амплитуда вибраций A (мм) , частота f (Гц).

Назначение указанных параметров фиксировать отдельные величины, характеризующие вес и также положение кареток машины в периоды стандартного и нестандартного режимов (разгона и торможения) работы машины; при моделировании пойменных насыпей и плотин фиксируются также уровни воды в бьефах.

К **третьей** группе параметров относятся: динамические напряжения на основной площадке моделей земляного полотна железных и автомобильных

дорог σ_d (кПа); статические напряжения в грунтах геотехнических сооружений σ_{cm} (кПа); напряжения на контактах σ_k (кПа) моделей геотехнических сооружений и моделей инженерных сооружений, работающих с ними совместно: устоев мостов, труб, подпорных, армогрунтовых и габионных стен и пр.; перемещения x, y, z (мм) различных точек моделей, как на их поверхности, так и внутри грунтовых моделей; перемещения отдельных точек моделей инженерных сооружений x_{uc}, y_{uc}, z_{uc} (мм); влажность w и плотность сложения ρ_d (г/см³) грунтов моделей (как для отдельных точек модели, так и по заданным контурам или областям); напоры воды в моделях геотехнических сооружений H_n (мм); скорости фильтрации v_f (м/с) или проницаемости v_n (м/с) в моделях геотехнических сооружений.

Все эти параметры являются носителями информации о состоянии модели, как во время нестационарных режимов, так и во время стационарного (основного) режима работы машины. Анализ этой информации позволяют оценить результаты решения задач, поставленных в конкретных экспериментах.

Система должна включать комплекс устройств и приборов, обеспечивающих контроль и измерение основных параметров собственно центробежной машины, устройства для токосъема от различных датчиков, размещенных во вращающихся каретках (как от датчиков, встраиваемых в модели геотехнического сооружения, так и от датчиков, размещенных на самих каретках и коромысле машины), систему дистанционного измерения различных параметров и видеозаписи.

3.2.2. Требования к контрольно-измерительной системе и системе поездной динамической нагрузки

Технические требования

Состав изделия и требования к конструктивному устройству

Контрольно-измерительная система должна иметь следующий состав:

а) набор стандартных приборов для измерения напряжения и силы тока, а также скорости вращения вала двигателя и горизонтального вала машины, скоростемеров для разовых показаний и записей скорости вращения центробежной установки;

б) системы для компьютерной обработки и записи показаний датчиков, установленных на отдельных узлах машины (показаний угломеров, уровней свободной воды в каретках, переходных сопротивлений в токосъемнике и пр.)

в) то же, для обработки и записи параметров нагрузочного устройства;

г) компьютерная система для записи и обработки показаний датчиков, размещаемых непосредственно в моделях (датчиков, фиксирующих напряжения, перемещения, влажность и плотность грунтов, фильтрацию, пьезометрические напоры; размеры датчиков не должны превышать 10 мм,

материалы, из которых они изготавливаются не должны существенно менять свои характеристики при воздействии модельного поля сил);

д) система для дистанционного съема информации, поступающей от датчиков;

е) система видеозаписи процессов, происходящих в моделях и компьютерной обработки результатов.

Показатели назначения

Показатели назначения представлены в таблице 3.4 в виде диапазонов изменения параметров контрольно-измерительной системы и требований к точности.

Таблица 3.4 Показатели назначения

№	Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Диапазоны изменения	Требуемая точность измерения
Показатели первой группы					
1.	Номинальная мощность двигателя	W	кВт	250	
2.	Напряжение	V	вольт	380/660	
3.	Номинальная частота вращения двигателя (горизонтального вала машины)	N_2	об/мин	1000	
4.	Частота вращения машины (скорость вращения)	N	об/мин	0-340	2
Показатели второй группы					
5.	Вес модели	G	кг	до 170	+0,5
6.	Угол разворота каретки	a	град	0-90	+0,5
7.	Уровень воды в каретке	H	мм	0-30	0,5
8.	Переходное сопротивление в токоъемнике	R	Ом		
9.	Параметры нагрузочного устройства	P	кН	0 - 0.160	0.0015
10.	Динамические напряжения в грунтах	σ_d	кПа	0-120	1
11.	Статические напряжения в грунтах	σ_{cm}	кПа	0-2000	1
12.	Перемещения	x, y, z	мм	0-200	0,1
13.	Влажность грунта. Влажность торфяных оснований	$w,$ w_m	-	0-0.5; 0-20	0,01
14.	Плотность сложения грунта	ρ_d	г/см ³	0,5-3,0	0,005
15.	Напоры воды в грунтах	H_H	мм	0-30	0,1
16.	Скорость фильтрации	v_ϕ	м/с	0-1	0,05

Требования к надежности

Контрольно-измерительная система должна обеспечивать надежную непрерывную работу в течение 15 часов.

Технический осмотр системы необходимо производить не реже, чем один раз в месяц.

В течение опыта допустим сбой или выход из строя не более 10% всех элементов системы, кроме тех, которые обеспечивают жизнедеятельность центробежной установки в целом.

Требования к технологичности и метрологическому обеспечению

Комплекс должен быть удобным при его эксплуатации. Для замеров характеристик отдельных устройств должен применяться как стандартный, так и специально разработанный измерительный инструмент. Требования к точности измерений приведены в таблице 3.4.

Требование к безопасности и влияние на окружающую среду

а) Уровень вибрации электродвигателя: высокой точности вибрационная скорость двигателя: не более 3 мм/с

б) Уровень шума на уровне 1 м от контура электродвигателя: средний уровень звукового давления: не более 90 дБА; уровень звуковой мощности: не более 100 дБ.

Требования к составным частям изделия

К составным частям изделия относятся:

для измерения параметров 1-ой группы: скоростемеры; стандартные приборы для измерения мощности, напряжения и силы тока двигателя;

для измерения параметров 2-ой группы: весы напольные; угломеры; сельсины; омметры; мессдозы; датчик LVDT; акселерометры.

для измерения параметров 3-ей группы: мессдозы; влагомеры; пенетрометры; установки для видеосъемки; датчики порового давления

Монтажные требования

Отдельные элементы контрольно-измерительной системы должны монтироваться стационарно. Элементы, которые монтируются непосредственно при конструировании модели геотехнического сооружения, не должны нарушать целостность модели и влиять на её расчетные параметры.

Для оснащения центрифуги РУТ(МИИТ) контрольно-измерительной системой использовались измерительные модули фирмы "National Instruments".

Было разработано два варианта контрольно-измерительной системы, различающихся по типу передачи данных:

Var.1) с использованием передачи данных через радио Ethernet (рисунок 3.5);

Var. 2) через оптоволоконную связь

Для первого варианта - измерительная система сбора предполагалось составить из двух контроллеров (PXI, CVS) и модулей сигналов (разработчик “ИЦ АСК”).

Такие модули позволяют работать как с датчиками имеющими чувствительный элемент мостового типа, так и с датчиками имеющими выход по напряжению или току. Измерительные модули подобраны из соображений максимальной универсальности системы с учётом соотношения цена-качество. Сигналы записываются в память контроллера PXI, установленного на коромысле центрифуги. Записанные сигналы могут быть предварительно обработаны и переданы через радио Ethernet на компьютер оператора. Управление вспомогательными устройствами может быть осуществлено через этот же контроллер.

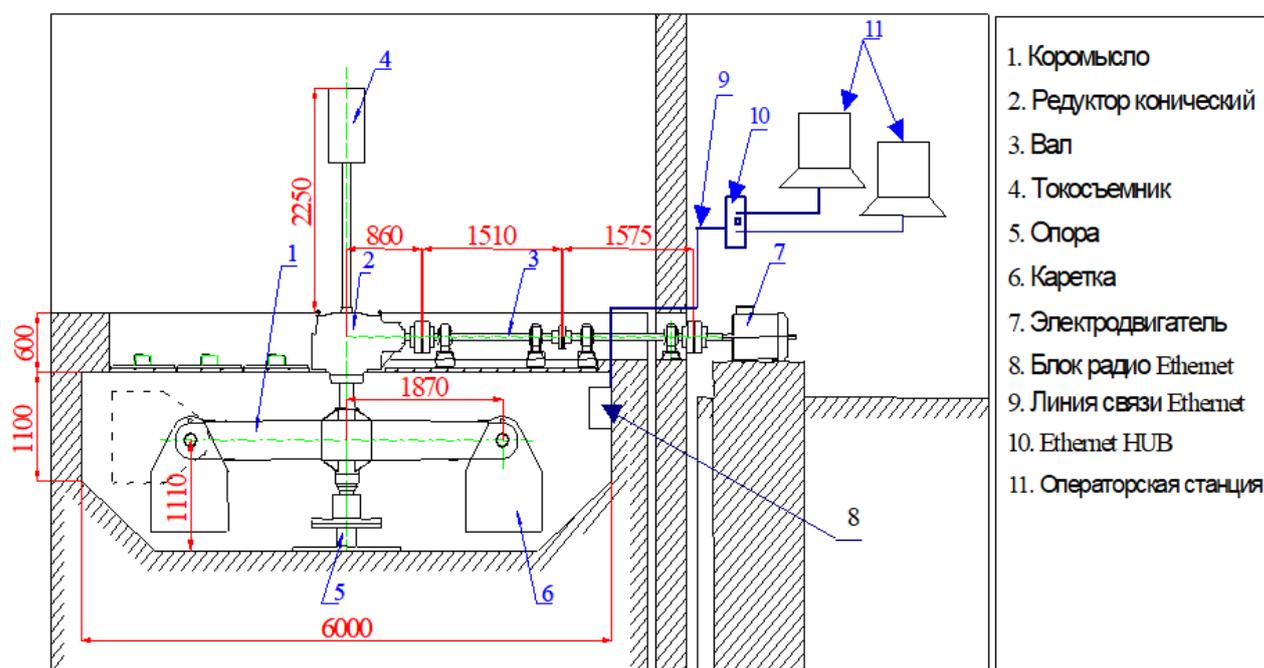


Рисунок 3.5 – Схема контрольно-измерительной системы вариант 1

Второй контроллер NI CVS, расположенный по центру центрифуги предназначен для обработки изображения, получаемого от камер, установленных непосредственно в зоне испытуемого объекта. Цифровые видеокамеры для проведения видеосъемки (compact vision - машинного зрения), работают со скоростью 30 кадров в секунду.

Видео контроллер имеет собственный канал передачи изображения типа радио Ethernet и позволяет подключить до 4-х цифровых видеокамер.

Второй вариант устройства контрольно-измерительной системы (разработчик “Actidyn Systemes”), представляет собой блок сбора данных, выполненный в стандартном шасси 19-дюймового стандарта высотой 6U (266,7 мм) и глубиной около 500 мм, адаптированный к высоким перегрузкам. Место

размещения - на одном плече коромысла центрифуги (посредством специального кронштейна) с применением дополнительной балансировки с помощью уравнивающей массы на другом плече.

При помощи набора контактных колец скольжения центрифуги обеспечивается подвод электропитания (не менее 500 Вт при напряжении 120 В или 240 В) к блоку сбора данных.

Для обмена информацией между блоком сбора данных и управляющим компьютером комнаты управления служит оптоволоконный Ethernet канал с использованием вращающегося оптического сочленения закрепляемого над вращающейся осью центрифуги.

Для работы системы сбора данных также необходимо наличие сигнала с системы управления двигателем с информацией о частоте вращения вала и потребляемой мощности.

Для автоматизированного управления работой двигателя целесообразна разработка пакета управляющих программ (в среде LabView компании "National Instruments").

Примерные конфигурации основной части оборудования:

Общее число каналов ввода информации - 59, из которых входов по напряжению (общего назначения) – 32; входов для тензодатчиков –16; входов для акселерометров (определения вибраций) – 8; входов для LVDT (определение перемещений) – 8; лицензия на пакет LabView –1; токосъемное устройство -1; вращающееся оптическое сочленение -1; оптоволоконные хабы - 2; шасси -1.

Нагрузочное устройство динамической поездной нагрузки

Для моделирования процессов в земляном полотне железных дорог необходимо учитывать воздействие подвижного состава на путь.

Для этой цели использовалась модель динамической поездной нагрузки, которая должна отвечать следующим требованиям:

Научные требования разработка принципиальной схемы динамической модели поездной нагрузки по схеме электромагнитного динамического воздействия; оптимальное расположение силовых элементов, создающих силовые воздействия на рабочую зону основной площадки модели земляного полотна; обеспечение подобия процессов нагружения в модели земляного полотна натурному воздействию от тяжеловесных и скоростных поездов.

Технические требования: выполнение конструктивной преобразовательной схемы силовых элементов на базе электромагнитных вибраторов с использованием сил взаимодействия ферромагнитного тела с внешним магнитным полем; подача питающего пульсирующего тока от специального генератора импульсов; каждый элемент должен позволять автономно создавать силовые воздействия на определенный участок основной площадки модели земляного полотна; обеспечение минимума потерь на вих-

ревые токи и гистерезис; обеспечение связи работы устройства с измерительной аппаратурой.

Программное обеспечение контрольно-измерительной и управляющей системы

Для контрольно-измерительной системой регистрации и управления режимами работы нагрузочного устройства динамической поездной нагрузки центробежной установки разрабатывалось программное обеспечение, по осуществлению управления: режимами разгона, моделирования и торможения центрифуги и нагружением моделей грунтовых сооружений поездной нагрузкой (рисунок 3.6); оперативно снимать, обрабатывать и записывать результаты измерений; выполнять видеосъемку процессов моделирования.

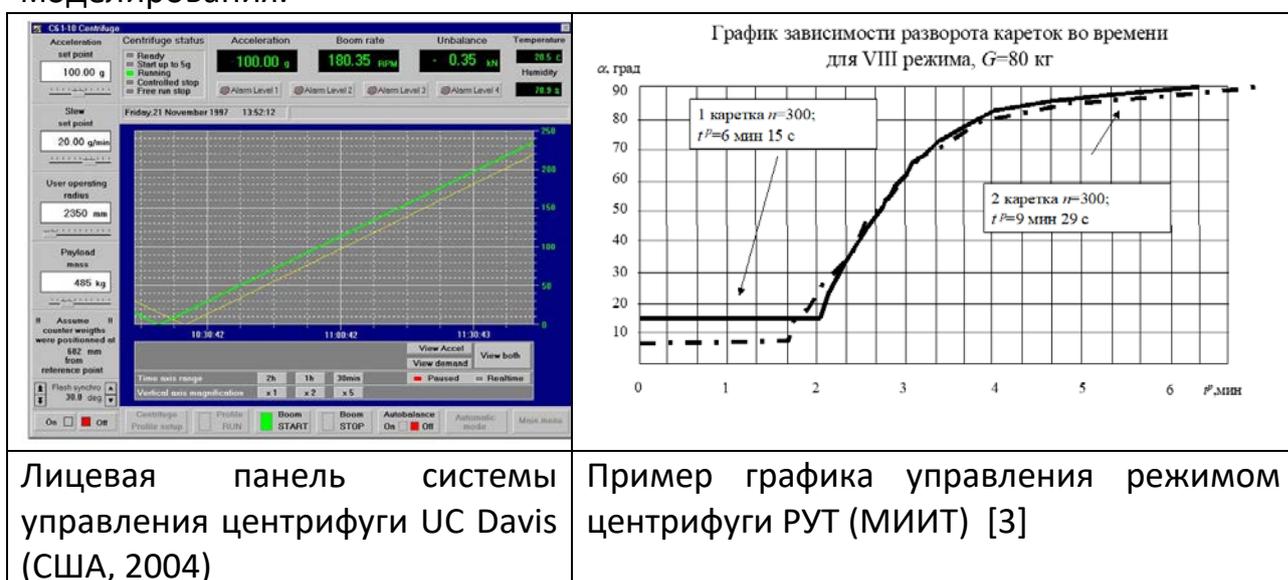


Рисунок 3.6 - Отображение визуальной информации о режимах работы центробежной установки

Основные контролируемые измеряемые параметры

При проведении исследований следует контролировать следующие параметры:

- плотность и влажность грунтов;
- перемещения (горизонтальные и вертикальные) отдельных частей геотехнических сооружений;
- время наступления предельного равновесия;
- удельные давления на исследуемые части геотехнических сооружений и конструкций, применяемых для их усиления.

Определение плотности и влажности грунтов модели производится при изготовлении и разборке моделей путем взятия проб грунтов в отдельных точках и основания с помощью режущих колец и определения соответствующих характеристик по ГОСТ 5180. Пробы грунта при изготовлении

модели отбираются из обрезаемых частей модели, а при разборке по оси модели через каждые 10-15 см в обе стороны не менее чем на двух горизонтах по высоте геотехнического объекта моделирования.

Перемещения (горизонтальные и вертикальные) отдельных частей модели фиксируются по оси, бровке и середине откосных частей модели. При этом на бровке и середине откоса фиксируется как вертикальное, так и горизонтальное перемещение, а по оси модели только вертикальное перемещение.

При моделировании геотехнических объектов, фиксация перемещений может осуществляться с помощью профилемера (рисунок 3.7).

Перед началом и по окончании моделирования выполняется измерение поперечного профиля при помощи профилемера в одном и том же сечении модели (например, в средней ее части). Сопоставление результатов выполненных измерений позволяет оценить конечные перемещение отдельных точек модели.

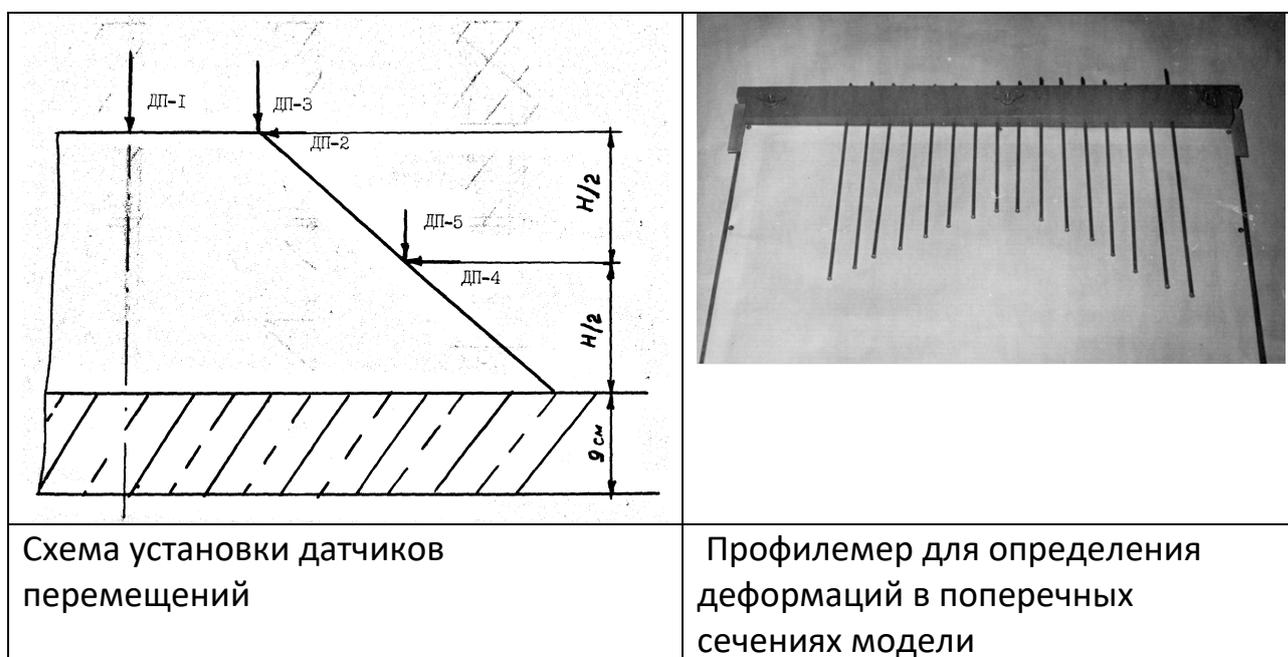


Рисунок 3.7 – Измерение перемещений на модели

Момент наступления предельного равновесия устанавливается с помощью датчиков предельного равновесия. Датчики предельного равновесия устанавливаются на основной площадке насыпи и на ее откосах. Установка датчиков производится слева и справа от оси каретки, на которой расположены датчики перемещений на расстоянии 5 см.

Удельные давления на отдельные части геотехнических сооружений и конструкций могут определяться датчиками давления, установленными в облицовочных элементах сооружения (подпорных стен высотой H_c).

Тарировка датчиков давления осуществляется в диапазоне удельных давлений от 0 до 100 кПа.

3.2.3 Методика конструирования моделей

Общие указания

Модели рабочей зоны насыпей, полотна насыпей, дамб и плотин конструируются из грунтовых паст соответствующей влажности и плотности сложения ρ_d (г/см³). При этом обычно контролируется удельный вес грунта γ (кН/м³), который связан с w и ρ_d зависимостью

$$\gamma = \rho_d \cdot g \cdot (1 + w) \quad (3.2)$$

Модели рабочей зоны выемок, откосов каналов и бортов карьеров конструируются из монолитов грунтов, но допускается и применение паст с соответствующим уплотнением грунта.

Модели оснований насыпи, дамб, плотин выполняются из паст, за исключением случаев, если моделируется насыпи на торфяных основаниях болот I типа или на основаниях из скальных грунтов.

Методика конструирования оснований моделей насыпей, дамб, плотин. Модели оснований из «грунтовых паст»

С учетом размеров кареток центробежной машины и размещения смотровых окон, рекомендуется при любых масштабах моделирования принимать толщину модели основания в 0.1 м. В этом случае после приготовления пасты грунта модель основания создается по всему размеру днища каретки слоями в 0.02 м с уплотнением до достижения равномерной заданной плотности. Уплотняется 6 слоев. Затем машина раскручивается по режиму VIII до достижения масштаба моделирования большего расчетного для данного опыта на 25-50. После торможения и остановки машины верхний слой основания счищается так, чтобы его толщина была равна расчетной $H_{ом} = 0.10$ м.

Для контроля влажности и плотности грунта при укладке и уплотнении каждого слоя пасты толщиной 0.02 м берутся пробы грунта кольцами или другими способами. После полной готовности модели основания берутся не менее 6 проб грунта для контроля влажности и плотности.

Задание численных значений w и γ_d для грунта основания назначается в зависимости от цели и характера опыта.

При укладке грунта в основание объем слоя толщиной 0.02 м составит $V_{сл} = 0.90 \times 0.40 \times 0.02 = 0.072$ м³.

Вес воды для достижения в слое грунта влажности w составит, кН

$$G_b = 0,072 \cdot w) \cdot \gamma_b$$

где γ_b – удельный вес воды, кН/м³ ≈ 10 кН/м³ .

Вес сухого грунта при влажности w будет, кН

$$G_d = 0,072 \cdot (1-w) \cdot \gamma_d$$

Модели оснований из скальных грунтов

При создании моделей оснований из скальных, крупнообломочных грунтов существуют сложности в обеспечении подобия натуральных и модельных материалов, так как крупность материала модели ограничивается его размерами, при превышении которых на маленькой модели перестает действовать закон больших чисел. Для исключения этого влияния необходимо установить допускаемый масштаб n_{dj} размеров зерен модельного материала, заменяющего натуральный крупнообломочный материал. Для этого крупность материала подбирается следующим образом [5].

Определяется расчетный размер d_0 (м) элементов горной массы для натурального основания. Затем, при известной площади поперечного сечения основания Ω (м²) количество элементов k горной массы можно найти как

$$k = \frac{\Omega}{\omega_0} (1 - n_0) \quad (3.3)$$

где ω_0 – площадь поперечного сечения элемента размером d_0 , м²;

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \text{ м}^2; \quad (3.4)$$

n_0 – пористость горной массы.

Далее задаются различными значениями масштаба перехода от размера элемента горной массы в природе к размеру частиц модельной горной массы и проверяют соблюдение закона больших чисел по уравнению Чебышева

Окончательно принимается искомое значение масштаба моделирования.

Методика конструирования моделей насыпей, дамб, плотин

Модели из однородного грунта

Модель выполняется из грунтовой пасты заданной влажности и плотности. Для этого при заданной в опыте высоте модели H_m (м) и известной ее ширине по основанию $L_{\omega m}$ (м) решается вопрос о том, набивать ли грунтовой пастой всю каретку или только пространство между ограничителями, которые могут быть выполнены из дерева.

Приготовленная грунтовая паста укладывается послойно - 2 (см.ри.5.1) в прямоугольную форму размером $0.90 \times 0.40 \times H_m$ (м³), если $L_{\omega m}$ близка к ширине каретки равной 0.90 м; или размером $L_{\omega m} \times 0.40 \times H_m$, если применяются ограничители. Толщина слоя грунта принимается 0.02 м. При укладке и уплотнении слоя после окончания этой операции берутся пробы грунта для контроля его плотности и влажности или применяется малый пенетrometer.

Определяется необходимый для достижения заданной влажности w вес воды G_w (кН).

После получения параллелепипеда из грунтовой пасты с заданной влажностью и плотностью грунта размерами $0.90 \times 0.40 \times H_m$ (m^3) или $L_{\text{шм}} \times 0.40 \times H_m$ срезается лишний грунт таким образом, чтобы была получена исследуемая модель сооружения. При этом конфигурация откосов может быть самой разнообразной, от линейной с уклонами $1:m$ до ломаной с разными уклонами $1:m_1, 1:m_2, \dots, 1:m_n$ или имеющей одну или несколько берм.

Модели из разнородных грунтов

При конструировании моделей из разнородных грунтов (строящихся сооружений или уже существующих) в каретку по всей ее площади или на ширину $L_{\text{шм}}$ укладывается слоями с уплотнением грунт нижнего слоя с достижением необходимой плотности и влажности. Толщина слоя 0.02 м.

Определяется вес воды в слое для достижения необходимой влажности.

После укладки части высоты сооружения H_m вырезается контур нижнего слоя грунта (рисунок 3.8).

Затем укладываются верхние слои другого грунта, и аналогично вырезается контур сооружения из двух слоев и т.д. до получения такой модели сооружения, которая необходима для опыта.

При укладке слоев из обрезаемых частей грунтов берутся пробы на влажность и плотность.

Методика конструирования рабочей зоны земляного полотна аналогична приведенной выше.

Методика конструирования моделей откосов выемок, каналов, бортов карьеров, угольных разрезов, неустойчивых склонов

В этих случаях модели конструируются из монолитов, из которых вырезается расчетный профиль модели.

Вблизи моделей откосов из обрезаемых частей грунтов берутся пробы на влажность и плотность.

При моделировании неустойчивых склонов или других откосных сооружений, сложенных разнородными грунтами сложного литологического строения допускается устройство моделей из грунтовых паст.

Методика конструирования моделей габионных конструкций

Для усиления или стабилизации потенциально-опасных или деформирующихся откосов насыпей и выемок эксплуатируемого земляного полотна железных дорог могут устраиваться подпорные стены из армированного грунта, в том числе с использованием сетчатых структур – габионных конструкций.

Конструктивно габион представляет из себя проволочный осто, заполненный камнем. Они могут быть цилиндрические и коробчатые.

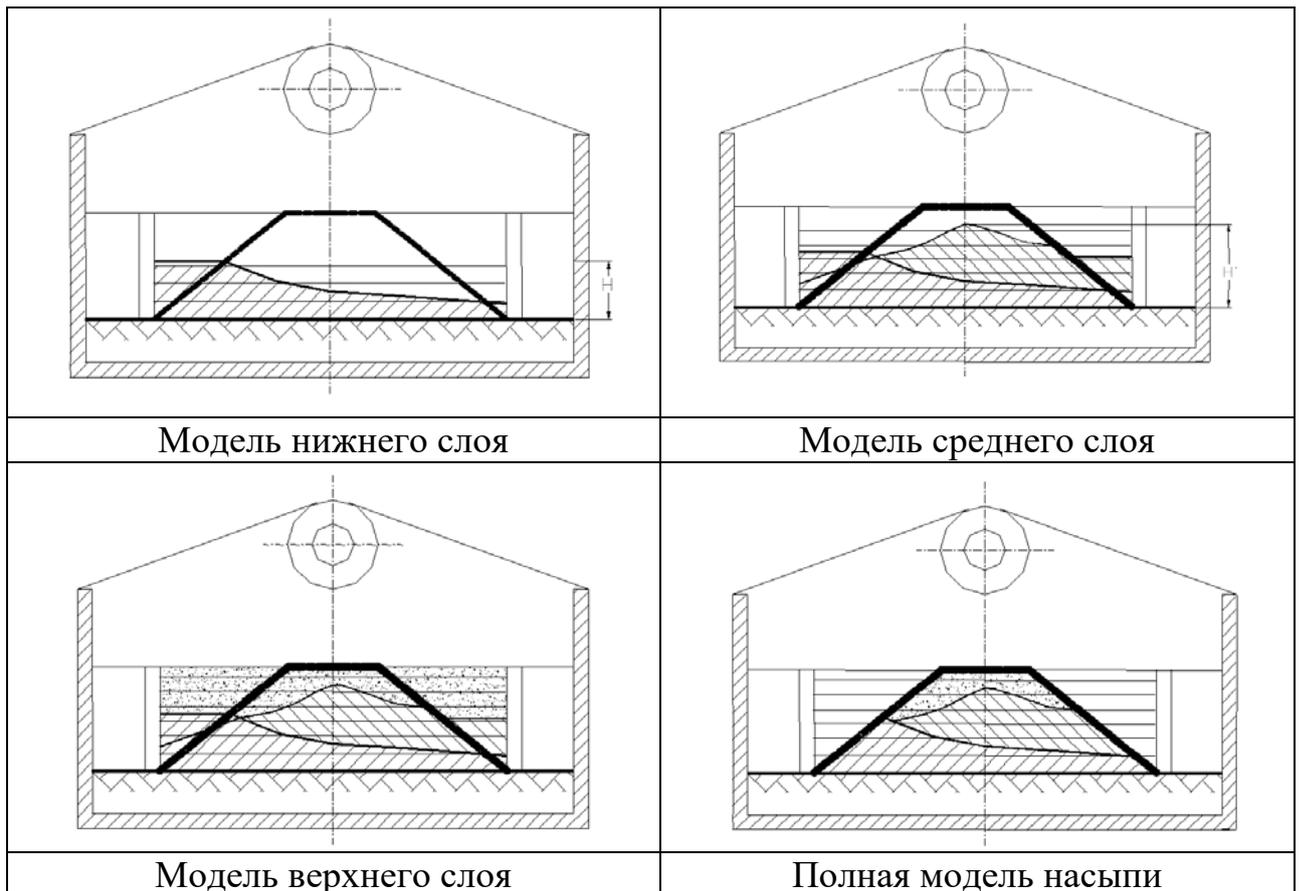
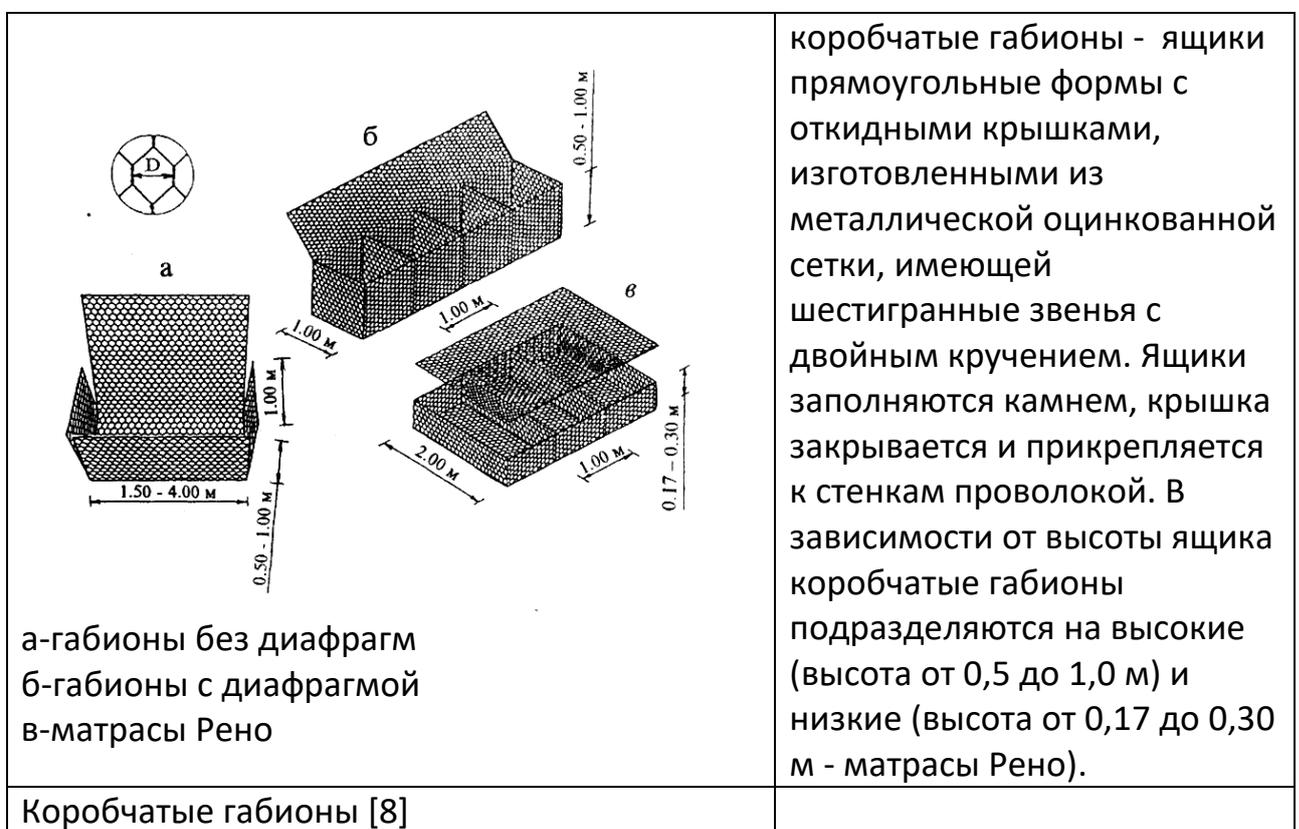


Рисунок 3.8 – Изготовление модели насыпи из разнородных грунтов [1]



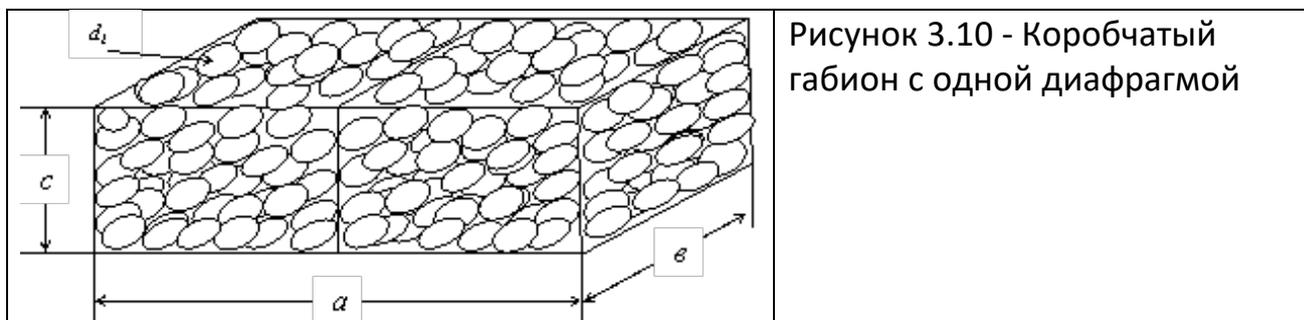
а-габионы без диафрагм
б-габионы с диафрагмой
в-матрасы Рено

коробчатые габионы - ящики прямоугольные формы с откидными крышками, изготовленными из металлической оцинкованной сетки, имеющей шестигранные звенья с двойным кручением. Ящики заполняются камнем, крышка закрывается и прикрепляется к стенкам проволокой. В зависимости от высоты ящика коробчатые габионы подразделяются на высокие (высота от 0,5 до 1,0 м) и низкие (высота от 0,17 до 0,30 м - матрасы Рено).

Коробчатые габионы [8]

Рисунок 3.9 – Прототипы конструкций усиления земляного полотна - габионы

Габионы могут быть разделены на ячейки посредством введения диафрагм, которые служат для упрочнения конструкции и облегчения работ по устройству и эксплуатации габионных сооружений (рисунок 3.10). Диафрагмы имеют такие же характеристики, что и сетка, из которой состоит габион. Они крепятся к раме основания габионов с шагом 1,0 м во время изготовления их на предприятии.



Для удержания грунта в геотехнических сооружениях применяются подпорные стены из габионных конструкций двух основных типов [8] :

1) гравитационные габионные стены, которые устраиваются из сетчатых коробчатых ящиков или цилиндрических структур, скрепленных между собой и заполненных камнем;

2) габионные стены системы Террамеш (грунтовых панелей), выполненные из сетчатых структур (габионов) и армирующих сетчатых панелей.

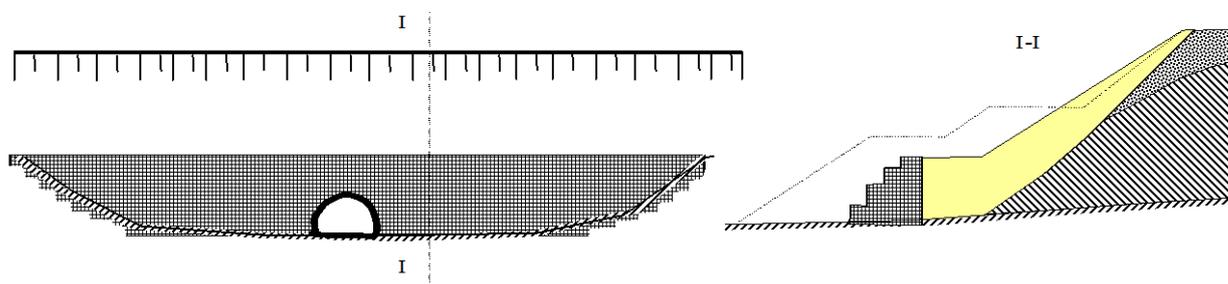
При конструировании моделей габионных сооружений необходимо соблюдать требования геометрического масштаба n сооружения и идентичности с натурой взаимосвязи с грунтовым массивом моделируемого геотехнического объекта. Конструирование модели сооружения выполняются из моделей отдельных габионов, поэтому соответствие модели сооружения натуре будет зависеть от того, насколько правильно создана модель отдельного габиона.

Решение этого вопроса можно разделить на три части: модель крупнообломочной породы, заполняющей габион, модель сетчатого короба и модель габиона в целом.

Модель обломочного материала создается следующим образом.

Рассматривается вертикальное сечение габиона, параллельное оси пути.

а) Гравитационные габионные стены (ГГС)



б) Стены системы Террамеш (СТ)

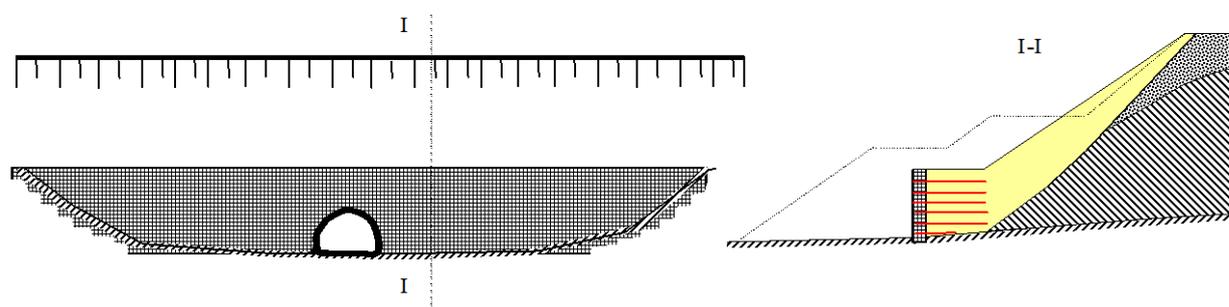


Рисунок 3.11 - Схема усиления насыпей габионными конструкциями

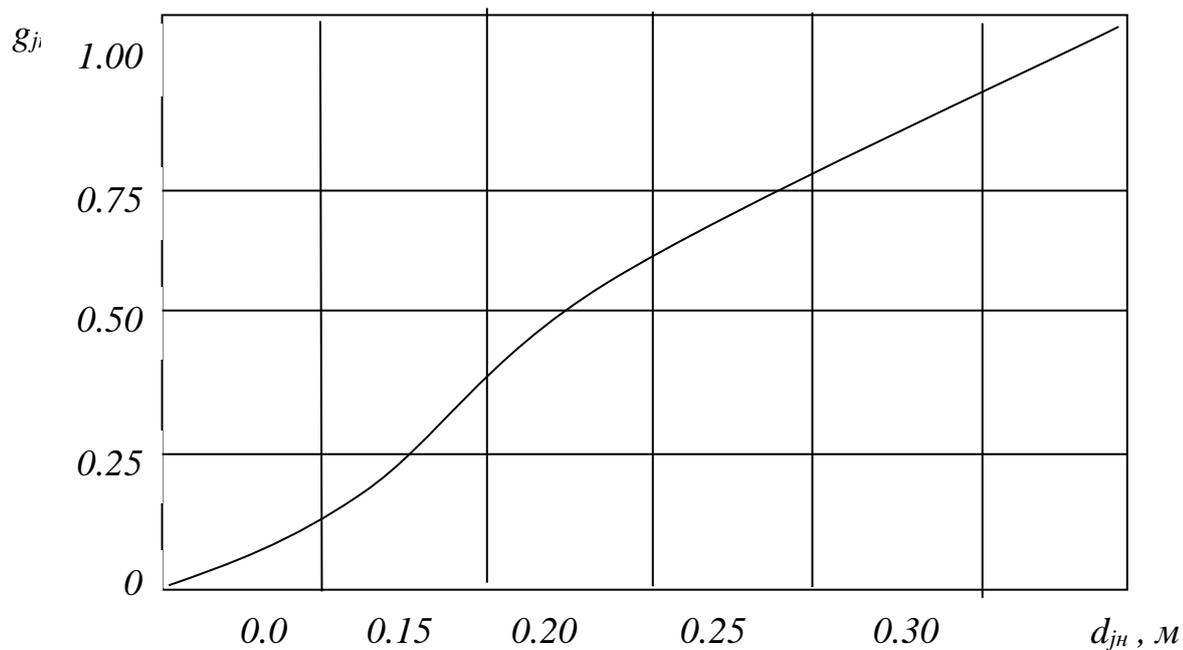


Рисунок 3.12 - Гранулометрический состав натурального камня [1]

Принимается, что все камни, заполняющие габион, имеют различные размеры d_{jn} , м (индекс “н” обозначает натуру).

В расчете заменяем реальный материал, имеющий гранулометрический состав, расчетным со средневзвешенным диаметром (все камни заменяются шарами) $d_{он}$, м.

Для модельного состава заполнителя габиона должно быть выполнено соотношение:

$$d_{0i} = \frac{d_{0i}}{n} \quad (3.5)$$

где n – масштаб моделирования (индекс “м” относится к модели).

Для того, чтобы это соотношение точно выполнялось необходимо иметь такой состав модельного заполнителя, при котором выполнялось бы два условия:

$$\begin{cases} d_{ji} = \frac{d_{ji}}{n} \\ g_{ji} = \frac{g_{ji}}{n} \end{cases} \quad (3.6)$$

Однако для выполнения этих условий необходимо для модельного материала иметь гранулометрическую кривую совершенно подобную натурной в которой значения $g_{jm} = g_{jn}$, а величины $d_{ji} = \frac{d_{ji}}{n}$. Такой состав путем подбора получить возможно, но затруднительно. Поэтому для практических целей возможно воспользоваться случайным составом (например, гравелистым песком), получить для него кривую, отличающуюся от приведенной на рисунке 3.12 и найти для нее значение d_{im} по уравнению, аналогичному. Чтобы убедиться, что данный материал подходит для создания модели габиона следует проверить, остается ли для него приемлемым закон больших чисел. Для этого находят вероятность отклонения от математического ожидания величин d_{im} по уравнению Чебышева [9].

Для простоты расчетов и большего приближения к натурному материалу принимают математическое ожидание $\zeta_i = d_{0i}$.

Величина удельного отклонения принимается экспериментатором как допускаемая, в зависимости от требований к точности эксперимента. Очевидно, что целесообразно принимать ее не более 0.05. При необходимости отсеиваются соответствующие фракции и снова делается необходимая проверка. Оценка подобия между модельным и натурным материалом может также проводиться через сравнение их коэффициентов неоднородности.

Принятый заполнитель должен быть подвергнут испытаниям на сдвиг с целью проверки необходимой прочности засыпки по углу внутреннего трения φ , при этом необходимо иметь $\varphi_m \approx \varphi_n$.

В модельной засыпке, как правило, может оказаться небольшое значение удельного сцепления $c_m \approx 1.0 \dots 2.0$ кПа, чего нет в натурной засыпке из камней. Однако этим можно пренебречь.

Создание модели сетчатой конструкции габиона вызывает большие трудности, так как при обычно применяемых масштабах моделирования $n = 50 \dots 100$ размеры ячеек сетки становятся настолько малы, что становится трудным подобрать такую сетку, чтобы этим размерам соответствовали бы приемлемые диаметры и прочность проволок. Поэтому задача может решаться приближенно: подбирается сетка с размером ячеек $d_i > \frac{d_i}{n}$ и проверяется ее модуль упругости. Он должен быть $E_{ym} \approx E_{yn}$, а также сопротивление сетки разрыву $R_{pm} \approx R_{pn}$.

Так как для наружной грани габиона сетка только создает условия ее вертикального положения, то она может быть заменена более жестким материалом, (например, гибкой пленкой со сквозными отверстиями), однако днище и крышка габиона, задняя грань должны быть выполнены по возможности из материала, имеющего такое же сопротивление сдвигу по контакту с заполнителем габиона, как и в натуре.

В целом, модель габионной стены должна оказывать сопротивление сдвигу и опрокидыванию [8], аналогичное натурному, так как на задней грани тены будут действовать напряжения, вызванные оползневым давлением от модели откоса геотехнического объекта (насыпи или выемки) или склона $E_{оп-м}$ равные натурным $E_{оп-н}$

То же относится и к отдельному габиону

В зависимости от выбранного масштаба моделирования различаются размеры моделей конструкций габионных сооружений, применяемых для усиления объектов земляного полотна. Для соблюдения полного подобия между натурной конструкцией габионной стены и ее моделью, размеры ее элементов должны быть уменьшены в n раз. Однако, если возможно изготовить уменьшенную копию габионной конструкции, нельзя обеспечить полное подобие между прочностными характеристиками натуральных материалов, из которых изготавливается модель габионной стены.

Так, если в натурном габионном сооружении габионы изготовлены из проволоки диаметром 2.5 ... 3.0 мм и заполнены камнем размером 0.10..0.30 м, то для изготовления точной модели при масштабе моделирования $n = 50$ необходимо изготовить сетчатый каркас габиона из проволоки диаметром $(2.5 \dots 3.0) / n = 0.05 \dots 0.06$ мм и использовать для моделирования камня щебеночную крошку размером $(0.10 \dots 0.30) / n = 0.002 \dots 0.006$ м = 2...6 мм. При этом необходимо выполнить расчет по определению допускаемого масштаба n_{di} размеров зерен модельного материала, заменяющего натуральный крупнообломочный материал.

Если для моделирования камня в габионной конструкции можно использовать щебеночную крошку, то моделирование сетчатой конструкции путем изготовлением такого тонкого проволочного каркаса практически трудно выполнимо. В связи с этим при наиболее применяемых масштабах моделирования $n=50$ и $n=100$ прямой перенос масштабов моделированию возможен только для моделирования камня, укладываемого в сетчатую конструкцию габиона и практически невозможен для моделирования самой сетчатой конструкции из-за невозможности ее изготовления. Поэтому при моделировании подобных конструкций приходится изменять масштаб линейных размеров сетчатой конструкции n_l , делать их крупнее. В этом случае принимается

$$n_l = n\alpha, \quad (3.7)$$

где $\alpha < 1$

Однако это сразу изменяет жесткость EI элементов сетчатой конструкции при сохранении масштаба $n_E = 1$, как это принято при центробежном моделировании и, следовательно, нарушается масштаб деформаций n_u , что не должно допускаться [9, 10]. В связи с этим следует использовать обобщенный масштаб n_{EI} .

В обычных условиях

$$n_{EI} = 1 * n^4 \quad (3.8)$$

или

$$n_{EI} = 1 * (n\alpha)^4 = n^4 \alpha^4 \quad (3.9)$$

и

$$n_E = 1/\alpha^4 \quad (3.10)$$

То есть необходимо уменьшить модуль упругости материала модельного элемента в $1/\alpha^4$ раз.

Таким образом, применение метода эквивалентных материалов для изготовления моделей конструкций габионных сооружений позволяет решить данную задачу. С этой целью предлагается использовать материалы, из которых возможно изготовить модель габионов и модуль упругости которого в $1/\alpha^4$ раз меньше натурального материала металлической оцинкованной габионной сетки.

Для изготовления моделей габионных конструкций могут использоваться:

- металлические сетки с размерами ячеек 0.2..0.5 мм;
- капроновые сетки с размерами 0.2..0.5 мм.

Из них могут быть изготовлены емкости, связанные между собой и заполненные гранитной крошкой или крупнозернистым песком, заменяющим натуральный камень.

Внешняя грань габионной конструкции должна обладать определенной жесткостью, чтобы обеспечить ее вертикальное рабочее положение.

Подбор материала для изготовления модели габионной конструкции должен быть предварительно обоснован расчетом прочности предлагаемой

модели конструкции на восприятие модельных сил и напряжений в соответствии с [8].

Методика моделирования рабочей зоны земляного полотна железных дорог

В соответствии с размерами кареток центрифуги РУТ (МИИТ) для размещения рабочей зоны двухпутного земляного полотна возможно применение только одного масштаба моделирования – 20, как это показано в разделе 2. При этом мощность моделируемой рабочей зоны составит только 2.0 м (на модели 0.10м). Это можно считать приемлемым для исследования процессов в рабочей зоне. При однопутном земляном полотне мощность моделируемой рабочей зоны будет примерно равна 3.5 м.

При моделировании рабочей зоны земляного полотна, у которой усиливается основная площадка прослойками различного рода (синтетическими текстильными материалами, геосетками, арматурой и пр.), модели должны выполняться из материала, модуль упругости E_m которого равен модулю упругости натурального материала E_n

$$E_m = E_n \quad (3.10)$$

Главной особенностью моделирования рабочей зоны земляного полотна железных дорог являются необходимость воспроизводства воздействия на модели основной площадки динамических напряжений σ_d (кПа) от поездной нагрузки [3]. На модели основной площадки должна воспроизводиться эпюра расчетных напряжений σ_d , величина которых равна натурным напряжениям.

Условия подобия натуральных объектов с моделями, усиленных различными материалами при центробежном моделировании будут соблюдены при обеспечении равных напряжений и сил с учетом масштаба действующих в них.

Условия подобия модели и натурны с учетом их укрепления различными материалами могут быть описаны выражениями с использованием параметров E - модуль упругости укрепления, кПа; F – область (площадь) укрепления, м²; R - предел прочности единицы укрепления, кН; m и n – индексы, обозначающие модель и натуральный опытный образец соответственно; n – масштаб моделирования.

Методика моделирования осадок, консолидации и стабильности геотехнических сооружений и их оснований

Методика моделирования осадок

При моделировании конечных осадок S_m (мм) в конце стационарного режима работы машины измеряются тем или иным способом вертикальные составляющие перемещений тех точек модели, осадка которых исследуется.

На рисунке 3.13 показан пример размещения датчиков перемещений на модели насыпи.

Величина конечной осадки в натуре S_H (м) будет

$$S_i = S_i \cdot n / 1000 \quad (3.11)$$

Продолжительность опыта определяется временем, в течение которого осадка затухает. Осадку считается законченной, если разница между двумя соседними показаниями датчиков вертикальных перемещений составит не более 0.01 мм[1].

Из величины конечной осадки вычитается та осадка, которая происходит в течение разворота каретки, это примерно $\frac{t_p}{2}$.

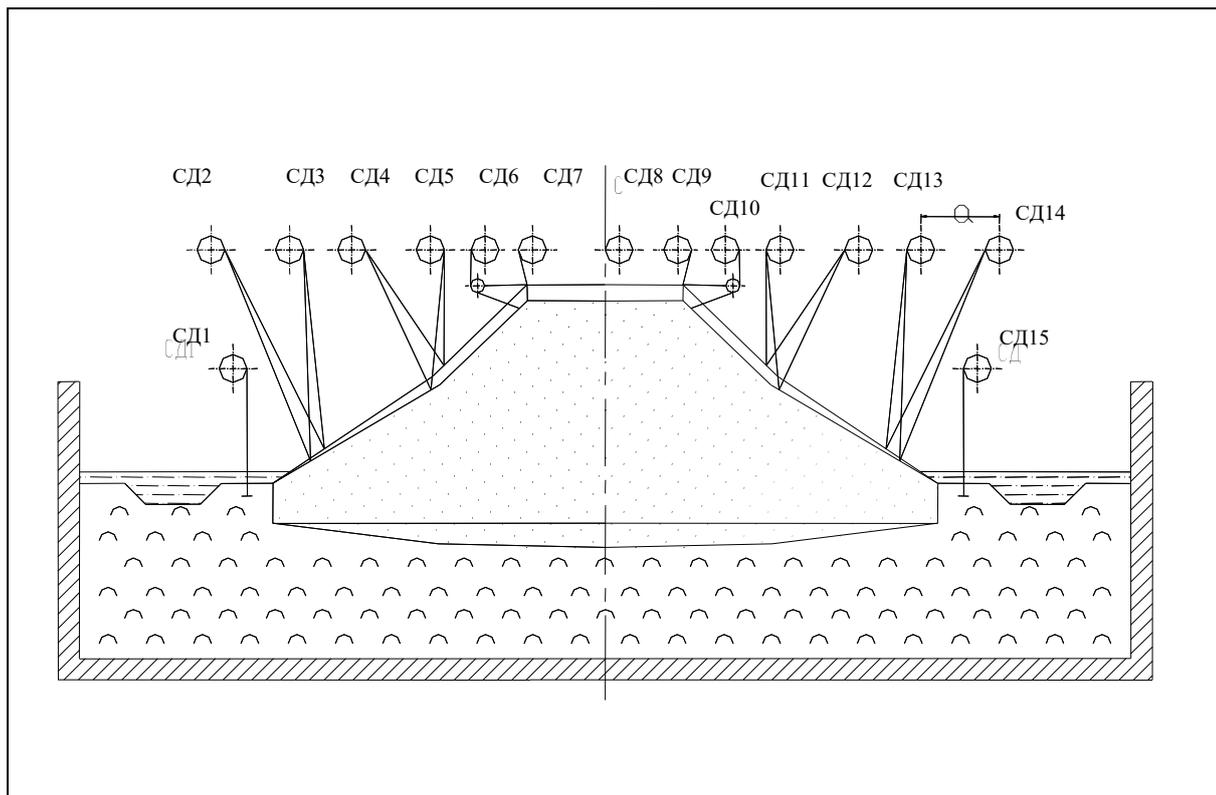


Рисунок 3.13 - Схема расположения датчиков перемещений, предназначенных для регистрации деформаций моделей насыпей [1]

Если проводится серия однотипных опытов, то желательно проверить примерное равенство численных значений критериев подобия моделирования конечной осадки по формулам [3].

$$\pi_1 = \frac{S}{L} = idem \quad (3.12)$$

$$\pi_2 = \frac{S}{\gamma \cdot L^2 \cdot a} = idem \quad (3.13)$$

где $S = S_m$ – конечная осадка в натуре, м;
 L – любой линейный размер сооружения (в данном случае принимается $L=H_H$), м;

γ – удельный вес грунта, кН/м³.

a – коэффициент сжимаемости грунта, м²/кН.

Методика моделирования консолидации

При моделировании консолидации в опыте фиксируется значение промежуточных величин осадки расчетных точек сооружения и затем строится кривая консолидации $S=S(t)$.

Пример зависимостей $S=S(t)$ для одной из моделей насыпи на болоте при его глубине B (м), высоте насыпи H (м) и глубине выемке торфа под насыпь b_m (м) показаны на рис.7.2. Точка 0 на графике соответствует времени моделирования $\frac{t_p}{2}$.

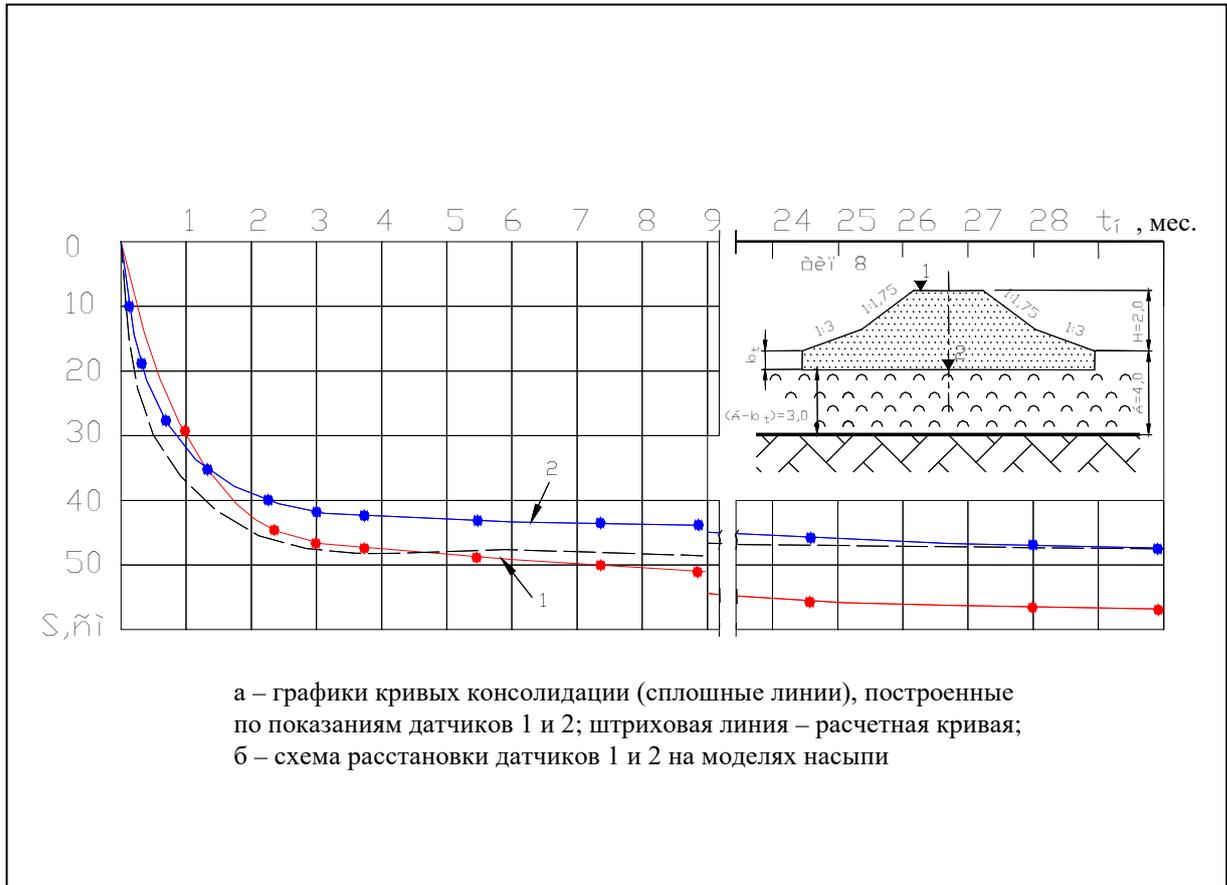


Рисунок 3.14 - Схема расположения датчиков для регистрации деформаций модели насыпи [3, 10]

Экспериментальная кривая сравнивается с расчетной, которая может быть получена расчетом по одному из аналитических выражений, описывающих процесс консолидации, например, для основания насыпи [3] с учетом коэффициента сжимаемости сплошной среды при компрессии, $m^2/\text{Кн}$, внешней статической постоянной равномерно распределенной нагрузки на поверхности основания, кПа , h – мощности сжимаемой толщи, м , c_k – коэффициента консолидации, $\text{м}^2/\text{сут}$, t – времени измеряемого в сутках.

При выполнении однотипных опытов с разными геометрическими параметрами проверяется примерное равенство критерия подобия [3].

Методика моделирования стабильности

При центробежном моделировании представляется возможность выполнять исследования процессов стабильности геотехнических сооружений и оценивать стабильность грунтов их оснований. Это возможно потому, что при этом методе физического моделирования в грунтах воспроизводятся все виды напряжений в натуральную величину.

При наличии датчиков напряжений и их размещении в грунте модели сооружения на основе сравнительного анализа показаний этих датчиков с показаниями датчиков перемещений, в том числе с учетом их изменения во времени, можно получить полную картину изменения состояния стабильности, ее оценку в течение опыта.

Упрощенно можно оценивать стабильность по коэффициентам стабильности, по формуле, определяемых по формуле Г.М. Шахунянца как

$$K_0 = \frac{f\sigma + c}{\tau} \quad (3.14)$$

где f и c – параметры сопротивления сдвигу грунта ($f = \operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент внутреннего трения грунта и c – удельное сцепление грунта, кПа)

σ и τ – нормальные и касательные напряжения действующие по наиболее вероятной площадке сдвига, кПа

Так как модели сооружений выполняются из натурального грунта при расчетных значениях его влажности и плотности, то f и c в опыте остаются натурными.

По найденным в эксперименте значениям σ и τ определяется K_0 для каждой расчетной точки сооружения или его основания и затем их можно сравнить с серией аналитических величин K_0 , определенных по расчетным величинам σ и τ , по формуле

$$K_{0-\min} = 2\sqrt{A(A-f)},$$
$$A = \frac{f\sigma_1 + C}{\sigma_1 - \sigma_2} \quad (3.15)$$

где σ_1 и σ_2 – главные напряжения, действующие в расчетных точках, определенные расчетом, кПа.

Методика моделирования устойчивости откосов и склонов

На центробежной установке РУТ (МИИТ) можно выполнять моделирование устойчивости откосов различных сооружений (насыпей, дамб, плотин, выемок, каналов, бортов карьеров, угольных разрезов), а также склонов.

При этом можно получать качественную и количественную характеристику процесса нарушения устойчивости, изучать физическую сущность протекающих процессов, а также отслеживать виды и процессы формирования поверхностей смещения во времени. Метод позволяет исследовать все указанные явления для сооружений, усиленных различными армогрунтовыми конструкциями и инженерными устройствами.

Особенностью методики моделирования устойчивости откосов и склонов является необходимость наличия кроме датчиков напряжений и перемещений специальных датчиков (датчиков предельного равновесия), которые фиксируют моменты образования трещин на поверхности модели. Это позволяет отслеживать момент начала нарушения предельного равновесия.

Масштаб моделирования, способы устройства моделей приведены выше.

Примеры моделирования представлены на рисунке 3.15, где показано:

- слева полученная в опыте форма поверхности смещения (смещенная часть откоса снята). Как видно, она очень близка к круглоцилиндрической [3];
- справа - вид модели эксплуатируемой насыпи, имеющей балластные углубления и шлейфы, после проведения опыта. Как видно на фотографиях, циркообразная форма смещения откоса полностью соответствует тому, что обычно наблюдается в натуре.

Для проверки и оценки достоверности результатов эксперименты могут повторяться при различных масштабах моделирования. Для этого проводятся однотипные опыты при одинаковых исходных данных, но при разных масштабах, с разными геометрическими параметрами и оценивается равенство между собой численные значения ряда критериев подобия, полученных при выполнении серии опытов.

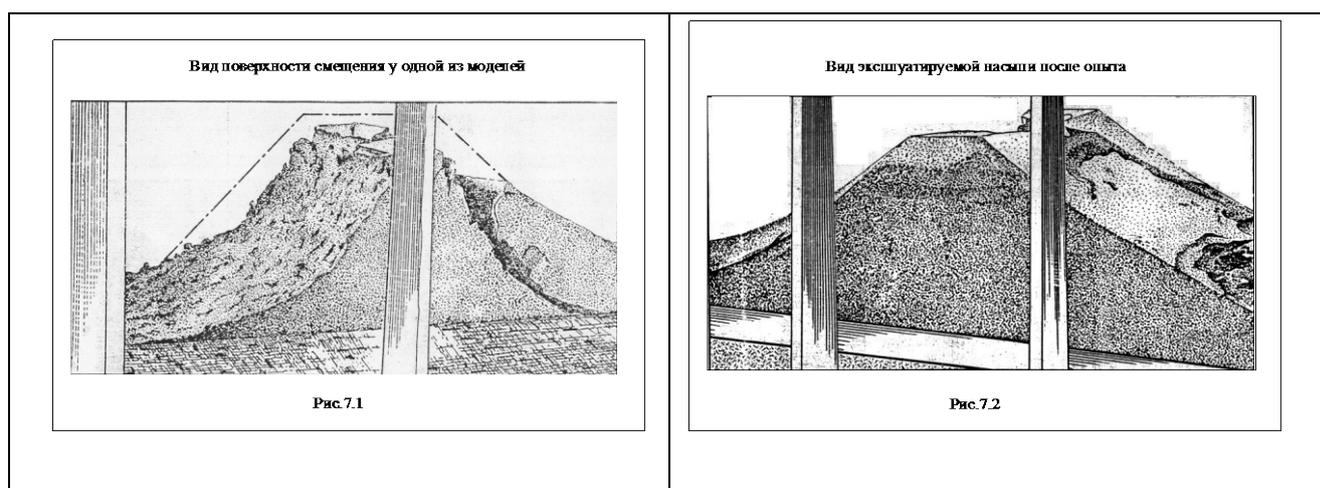


Рисунок 3.15 – Примеры моделирования устойчивости откосов [3]

Для этой цели, может использоваться один из универсальных критериев, специально полученных для моделирования объектов земляного полотна железных дорог [3].

Методика моделирования объектов земляного полотна, усиленных габионными конструкциями

В РУТ (МИИТ) был разработан ряд способов стабилизации и усиления длительно эксплуатируемых насыпей с использованием различных армогрунтовых конструкций: армогрунтовых стен, габионных стен, стен системы Террамеш, стягивающих элементов и анкеров.

Взаимодействие таких конструкций с грунтами геотехнических сооружений недостаточно хорошо изучено. При проектировании таких конструкций одной из основных задач является определение и обоснования достаточности их размеров. Для этой цели используются, в основном, инженерные методы расчетов, которые приближенно отражают физическую природу указанного взаимодействия.

Применение расчетов НДС по методу конечных элементов дает более полную картину, однако, интерпретация результатов расчетов напряженно-деформируемого состояния сооружения затруднена, требуется в т.ч. верификация результатов.

В связи с этим, решение многих вопросов, связанных с исследованием взаимодействия системы геотехническое сооружение - армогрунтовая сетчатая конструкция, устроенной из габионов для усиления земляного полотна, методом центробежного моделирования является наиболее эффективным средством, так как позволяет сохранить в опыте физическую природу изучаемого явления и получить в сжатые сроки информацию о состоянии моделируемого объекта и выполнить его прогноз. В то же время, при моделировании объектов земляного полотна наряду с моделями объектов земляного полотна, выполненных из натуральных грунтов возникает необходимость моделирования материалов армогрунтовых сооружений, габионных конструкций, выполненных из сетчатых структур, которые не идентичны грунтам. И это требует теоретического обоснования для моделирования таких конструкций в поле центробежных сил, имея ввиду моделирование системы геотехническое сооружение -сетчатая конструкция из габионов.

существуют трудности в обеспечении полного подобия при использовании для изготовления моделей натуральных материалов для наиболее распространенных масштабов моделирования $n=50$ и $n=100$.

Поэтому для решения задач моделирования усиления объектов земляного полотна габионными структурами могут разрабатываться два основных подхода:

1) соблюдение полного подобия - применение наряду с моделями объектов, выполненных из натуральных грунтов, моделей сетчатых габионных конструкций изготовленных из эквивалентных материалов;

2) использование приближенного подобия - наряду с моделями объектов, выполненных из натуральных грунтов, модели сетчатых габионных конструкций изготавливаются из натуральных материалов, однако при этом существует некоторое противоречие между масштабами моделирования n и масштабными коэффициентами n_A , используемыми для описания определяющих параметров сетчатых конструкций. В то же время, так как изучается поведение системы- объект земляного полотна, усиленный габионной конструкцией эти противоречия не должны играть существенной роли.

Существует и третий подход к решению данной задачи, который связан с моделированием только одной части системы – габионной конструкции. Для этой цели изготавливается только модель габионной конструкции, с учетом возможности ее устройства в уменьшенном масштабе, чтобы была обеспечена возможность ее моделирования в поле центробежных сил на установке РУТ (МИИТ). Однако моделирование такой конструкции предполагает применения дополнительных устройств, с помощью которых возможно было бы создавать и прикладывать горизонтальные нагрузки, имитирующие действие избыточного оползневое или активного давления на габионные стены. Для этого необходимо специальная разработка таких устройств, способных работать в поле действия центробежных сил.

Только анализ практических результатов моделирования позволит оценить, какой из рассмотренных подходов для моделирования объектов земляного полотна, усиленных габионными конструкциями, является наиболее предпочтительным и эффективным.

Характеристика программы моделирования

Для проведения моделирования геотехнических объектов составляется программа выполнения экспериментов, которая как правило включает в себя описание серии опытов.

Для каждого опыта ставится цель и задача опыта, выполняются расчеты по оценке устойчивости геотехнического объекта для определения причин и условий его деформирования, для разработки возможных технических решений по его стабилизации или усилению.

Приводятся характеристики модели (геометрического очертания, физико-механических свойств грунтов и материалов, используемых для изготовления грунтовых сооружений и конструкций для их усиления).

Планируется программа разгона и торможения центрифуги. Режимы разгона и замедления принимаются в зависимости от того, какие объекты моделируются строящиеся или эксплуатируемые, с учетом сохранения

необходимой влажности грунтов модели. Разрабатывается программа приложения ступеней нагрузок от подвижного состава.

По окончании моделирования производится взятие проб грунтов на плотность и влажность. В зависимости от результатов предыдущего опыта – (при отсутствии деформаций) производится корректировка условий моделирования (например, увеличение влажности грунта) и моделирование повторяется.

Результатом первой серии опытов является определение влажности и плотности грунта при которых обеспечивается разрушение объекта в диапазоне исследуемых нагрузок.

Вторая серия опытов направлена на проверку и уточнение методики расчета необходимых размеров усиливающих сооружений, в том числе габионных стен.

При отсутствии деформаций после каждого опыта изменяются размеры усиливающего сооружения (например, уменьшается высота стены на 1 или 2 габиона).

В результате моделирования определяются размеры усиливающих сооружений (габионных стен), обеспечивающие отсутствие деформаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение установки центробежного моделирования РУТ (МИИТ) позволяет решать широкий круг научных и технических задач в области строительства и эксплуатации геотехнических сооружений, в том числе проводить:

- анализ состояния железнодорожных насыпей и выемок, экспериментальную оценку их прочности и устойчивости с учетом динамических поездных воздействий с целью прогнозирования эксплуатационной надежности объектов земляного полотна;

- моделирование различных воздействий на грунтовые сооружения от подвижного состава в зависимости от осевых нагрузок и скоростей движения поездов, подтопления паводковыми водами с учетом реального времени происходящих деформаций и нарушений устойчивости при предельных режимах испытаний;

- оценку достоверности результатов расчетов усиления земляного полотна с использованием различных расчетных моделей;

- оценку работоспособности и эффективности существующих и новых способов стабилизации и усиления объектов земляного полотна, в том числе с использования армогрунтовых (габионных) сооружений и конструкций;

- оценку и прогноз стабильности слабых оснований различных сооружений;

- оценку и прогноз осадок оснований различных строящихся и эксплуатируемых объектов;
- оценку использования различных геотехнических материалов для улучшения свойств грунтов.

Список использованных источников

1. Виноградов В.В., Яковлева Т.Г., Фроловский Ю.К., Зайцев А.А. // МГУПС (МИИТ) геотехническая установка МИИТа. опыт и перспективы применения, 2004, 87с. рукопись
2. Определение расчетных параметров машины для центробежного моделирования сооружений из грунта: Отчет о НИР «Комплексное исследование работы пути под нагрузкой» / МИИТ; Руководитель Г.М. Шахунянц.-М., 1962.- 99с.
3. Яковлева Т.Г., Иванов Д.И. Моделирование прочности и устойчивости железнодорожного полотна.- М.: Транспорт, 1980.-255с.
4. Яковлева Т.Г. Исследование возможности моделирования строительного периода при возведении железнодорожных насыпей // Труды МИИТа, Вып.273.- М.: Изд-во МИИТа, 1968.-С.40-49.
5. Яковлева Т.Г. Развитие теории и практики центробежного моделирования земляного полотна. Проблемы и нерешенные задачи // Труды МИИТа, Вопросы повышения эксплуатационной надежности железнодорожного пути; Вып.760.- М.: Изд-во МИИТа, 1985. С. 3-9.
6. Яковлева Т.Г. Определяющие процессы и определяющие параметры при центробежном моделировании // Межвузовский сборник научных трудов; Труды МИИТа, Вып.739.- М.: Изд-во МИИТа , 1983. С.3-9.
7. Обобщенная информация об эксплуатируемых насыпях. Совершенствование расчетных моделей и результаты центробежного моделирования//Отчет о НИР (промежуточный). Руководитель Т.Г Яковлева, Тема 49/89, МИИТ, Москва, 1989. Рукопись
8. Технические указания по применению габионов для усиления земляного полотна / Департамент пути и сооружений МПС: Утв.30.12.97. ЦПИН№22/43.-М.: ПТКБ ЦП МПС, 1998.-140с.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293828/4293828657.pdf>

(Указания разработаны в 1998 г. д.т.н., проф. Виноградовым В.В., д.т.н., проф. Яковлевой Т.Г., к.т.н., доц. Фроловским Ю.К., инженерами Анисимовой Н.Д., Виноградовой Г.А., Зайцевым А.А., Моргуненко В.И.)

9.Яковлева Т.Г. Принципиальные основы применения армирования грунтов для усиления эксплуатируемых насыпей // Межвузовский сборник научных трудов: Повышение надежности работы железнодорожного пути. Вып.844.-М.: Изд-во МИИТа , 1992. С.45-58.

10.Vinogradov V.V., Yakovleva T.G., Frolovsky Yu.K., Zaitcev A.AI. Centrifugal modeling of the railway embankments with reinforcements by the various earth constructions// Proceedings of the International Conference on Physical modeling in Geotechnics /ICPMG'02, St. John's /Newfoundland, Canada, 10-12 July, /2002. P.987-991.

<https://issmge.org/uploads/publications/1/22/STAL9781614996569-1805.pdf>

11.Описание применения комплекса программ к расчету устойчивости насыпей с учетом динамического воздействия поездов (программа ДКУ)// Отчет (закл.) о НИР №23/98 «Разработка программного обеспечения расчетов устойчивости насыпей с учетом динамического воздействия поездов при скоростном движении» /МИИТ; Руководитель В.В.Виноградов, отв. исполнитель Зайцев А.А.- М.,1998.- 101 с.

12.Зайцев А.А., Завалишин А.А. Расчет устойчивости насыпей и использование возможностей электронной таблицы EXCEL и VBA Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава». Днепропетровск., ДИИТ,1998, С.37-38.

13.Зайцев А.А. Программное обеспечение проектирования и расчетов земляного полотна: Методические указания. М.:Изд.МИИТа, 2006.- 145с.

14.Левитский В.Е. Физико-технические процессы в строительстве <https://en.ppt-online.org/416818> ссылка январь 2020 (теплопроводность в строительстве)

15.Крамаренко В. В. Грунтоведение // Учебник 1-е изд. - Сер. 11 Университеты России 1 ТПУ, г. Томск, 2018, М. Издательство Юрайт - 430 с. ISBN: 978-5-534-01339-9 (теплопроводность грунта...)