

Доступность заправочных станций для экологических автомобилей

Батаев Владислав Валериевич

Deng H. и соавторы научной статьи «Новая система Dro, зависящая от принятия решений, учитывающая косвенные сетевые эффекты при планировании расширения инфраструктуры снабжения водородом» делают вывод, что на ранней стадии коммерциализации автомобилей на водородных топливных элементах (HFCV) наблюдается общая положительная корреляция между продажами HFCV и развертыванием водородных заправочных станций (HRSS), что создает трудности при планировании инвестиций в HRSS. В этой работе представлен новый метод планирования расширения инфраструктуры водородоснабжения (HSI), учитывающий косвенные сетевые эффекты. Во-первых, чтобы охарактеризовать влияние решений по планированию HRS на HFCV, предлагается инвестиционные ограничения, учитывающие одновременный ремонт оборудования, ограничения по перераспределению транспортных потоков и метод расчета потребности в водороде для каждого транспортного средства. Во-вторых, чтобы охарактеризовать влияние HFCV на решения по планированию персонала, предлагается набор неопределенностей, зависящих от принятия решения, в котором представлены эндогенные и экзогенные факторы, влияющие на неопределенность. Используя концепцию "неудовлетворенности вне выборки", предлагается новый подход к количественной оценке инвестиционного риска. Кроме того, устанавливается более строгую верхнюю границу риска, применяя теорию масштабирования вероятности и теорию концентрации измерения. Затем ставится задача, зависящая от принятия решения распределительно-устойчивой оптимизации (DRO), учитывающую потенциальные инвестиционные возможности, чтобы разрешить противоречие, заключающееся в том, что снижение консервативности решений и снижение разочарованности вне выборки не могут быть достигнуты одновременно. Для решения этой задачи оптимизации предложен основанный на логике итеративный метод решения. Он позволяет эффективно избежать

неконтролируемого планирования инфраструктуры из-за положительных эффектов между транспортными средствами и станциями. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод позволяет снизить затраты на выборку на 5,2% и 4,1% соответственно при одновременном снижении инвестиционных затрат [12].

Jiang L. совместно с соавторами научной статьи «Двухуровневая модель оптимизации расположения водородной станции с учетом стоимости водорода и дальности действия» приходят к выводу, что в целях устойчивого развития во всем мире все шире внедряются транспортные средства на водородных топливных элементах (HFCVs), что позволяет сократить выбросы углекислого газа в транспортном секторе. Строительство водородных заправочных станций (HRSs) является ключом к популяризации HFCVs. Популярности HRSs препятствуют стоимость, выбор места и ожидания пользователей. Выбор заправочных станций с развитой инфраструктурой и большим пассажиропотоком для расширения HRSs может повысить точность сети заправок водородом. Снижение опасений пользователей HFCV по поводу дальности полета и улучшение покрытия маршрута HFCV - это благоприятный способ расширить производственную цепочку водородных транспортных средств. Таким образом, в данном исследовании предлагается двухуровневая модель программирования, которая учитывает источник водорода (HS), режим подачи водорода (HDM), начальный оставшийся запас хода, беспокойство по поводу дальности полета и другие факторы. Модель верхнего уровня предназначена для оптимизации экономических затрат, включая общую стоимость цепочки HRS. Нижний уровень направлен на то, чтобы оптимизировать дальность полета пользователей HFCV и более точно отражать их автономность, контролируя максимальный оставшийся запас хода автомобиля. Наконец, в качестве примера была взята скоростная автомагистраль в китайской провинции Ляонин, чтобы убедиться в том, что оптимизационная модель обладает такими преимуществами, как низкая стоимость водорода и минимальная дальность полета. Был проведен анализ

затрат на несколько HSS и HDMS с точки зрения выбора наилучшей площадки, и было установлено, что HSS в Аньшане, использующая уголь для производства водорода, и длиннотрубный прицеп могут обеспечить более низкие затраты на водород для HRS. Этот метод применим к другим регионам или всем типам HFCV [20].

Также Deng H. вместе с соавторами в научной статье «Метод планирования инфраструктуры снабжения водородом с учетом косвенных сетевых эффектов» приходят к выводу, что на ранней стадии коммерциализации транспортных средств на водородных топливных элементах (HFCV) существует тесная причинно-следственная связь между парком HFCV и планированием водородных заправочных станций (HRSS), также известная как косвенные сетевые эффекты. Это важнейший фактор, который не был учтен и который нельзя игнорировать при планировании инфраструктуры водородного снабжения (HSIP). Чтобы смоделировать косвенные сетевые эффекты, детально оценивается влияние часового планирования на парк HFCV, предлагая метод расчета запаса топлива для водителей, определяя удобство заправки водородом и учитывая взаимосвязанные ограничения между водородной сетью и транспортной сетью. Далее, характеризуется влияние HFCV на планирование HRS, построив зависящую от принятия решения задачу распределительной оптимизации с учетом неопределенности парка HFCV. Инновационно определяется верхняя граница критерия неоднозначности Вассерштейна, связанного как с эндогенными, так и с экзогенными факторами. Предлагаются эффективные методы линеаризации для устранения нелинейных ограничений в модели косвенных сетевых эффектов и преобразования задачи двухэтапной оптимизации в решаемую задачу MILP. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод позволяет принимать более экономичные инвестиционные решения и достигать более высокой эффективности использования энергии. Что еще более важно, в рамках этой системы планирования инвесторы могут более гибко устанавливать

параметры модели в соответствии с ситуацией на рынке HFCV, тем самым способствуя популяризации HFCV [13].

В научной статье «Местоположение и пропускная способность городской водородной заправочной станции на основе емкостной модели определения местоположения с учетом отклонения расхода» Gao Z. совместно с соавторами делают вывод, что в рамках усилий Китая по достижению нейтральности в максимизации уровня выбросов углекислого газа и углерода транспортные средства на водородных топливных элементах (HFCV) стали новым направлением исследований в рамках транспортных исследований с нулевым уровнем выбросов. Однако широкое внедрение HFCV сталкивается с серьезной проблемой: нехваткой водородных заправочных станций (HRS), которые сдерживаются дорогостоящим строительством и эксплуатационными расходами. В ответ на вызовы, связанные с эффективным использованием HRS, в нашем исследовании предлагается новый метод оптимизации местоположения и пропускной способности городских HRS. Добавляя ограничения по пропускной способности к модели учета потока отклонений, предлагается модель определения местоположения с учетом отклонений и спроса (CDDCLM) для достижения более эффективного соответствия спроса и пропускной способности. С помощью моделирования в сети с 24 узлами было подтверждено, что предложенная модель повышает эффективность стратегии распределения HRS. Преобразуйте зафиксированный спрос в доход и добавьте затраты в годовом исчислении, чтобы создать комплексную целевую функцию, которая определяет наиболее эффективную с точки зрения затрат стратегию для местоположения и пропускной способности городских транспортных средств. Наконец, практичность подтверждается подробным эмпирическим анализом, проведенным в Синине, провинция Цинхай, который убедительно доказывает его эффективность и практическую полезность [16].

Peng M. с группой соавторов в научной статье «Совместное планирование водородных заправочных станций и распределенных генераторов на возобновляемых источниках энергии в активной

распределительной сети для распределенного потребления энергии и повышения гибкости» приходят к заключению, что интеграция водородных заправочных станций (HRSS), оснащенных локальным электролизером и топливным элементом, в активную распределительную сеть (ADN) повышает как потребление электроэнергии от распределенных генераторов на возобновляемых источниках энергии (DRG), так и эксплуатационную гибкость ADN. Для достижения этой цели предлагается двухэтапная надежная модель совместного планирования HRSS и DRG в рамках ADN, охватывающая этапы инвестирования и эксплуатации. На этапе инвестирования выбор площадки и определение мощности компонентов HRSS и DRG определяются совместно. На этапе эксплуатации на основе результатов планирования инвестиционного этапа разрабатывается оптимальное расписание ADN с учетом взаимосвязи между ADN и транспортной сетью (TN). Путем моделирования работы ADN с HRSS и DRG на этапе эксплуатации определяются оптимальные результаты совместного планирования, которые сводят к минимуму общие затраты. Для описания режимов движения и дозаправки транспортных средств на водородных топливных элементах (HFCV) в TN и оценки их потребностей в заправке водородом была введена модель транспортного потока с равновесием между пользователями (UE). Двухэтапная надежная модель совместного планирования (TRCPM) разработана с использованием надежной оптимизации для управления неопределенностью, а также некоторых методов линеаризации, а также алгоритма генерации вложенных столбцов и ограничений (NC&CG), чтобы сделать ее более гибкой. Моделирование гибридной сети распределения электроэнергии по 33 шинам и транспортной сети с 24 узлами демонстрирует эффективность предложенной модели совместного планирования [38].

В научной статье «Оптимальное планирование водородных заправочных станций с учетом сбалансированного использования ресурсов» Meng X. и соавторы приходят к выводу, что по сравнению с электромобилями

автомобили на водородных топливных элементах обладают рядом преимуществ, в том числе большей скоростью и дальностью полета. Кроме того, автомобили на водородных топливных элементах работают на водородной энергии, которая считается самым чистым из доступных источников энергии. Таким образом, широкое внедрение транспортных средств на водородных топливных элементах будет способствовать повышению эффективности использования экологически чистой энергии и снижению зависимости от ископаемого топлива. Оптимальное планирование водородных заправочных станций является важным фактором, ограничивающим разработку и продвижение транспортных средств на водородных топливных элементах, и также является предметом данной работы. В частности, рассматривается вопрос об оптимальном размещении и размерах станций заправки водородом с учетом различий в коэффициентах использования ресурсов между станциями, чтобы добиться сбалансированного использования ресурсов заправки на всех станциях. Наконец, приводится примерный пример, демонстрирующий осуществимость и эффективность предложенного метода [31].

По мнению Zhen L. и соавторов научной статьи «Оптимизация местоположения водородной заправочной станции в условиях неопределенности» водородные заправочные станции (HRS) необходимы для развития индустрии водородной энергетики и транспортных средств на топливных элементах, что делает стратегическое решение об их расположении и масштабе критически важным. Это исследование продвигает проблему оптимизации местоположения HRS, интегрируя сетевое планирование и оптимизацию водородного расписания - новый подход, который решает, где и насколько большими должны быть HRS, наряду с управлением отношениями с поставщиками и планированием транспортировки водорода. Уникальность проекта заключается в том, что он учитывает факторы неопределенности в спросе на водород, используя двухэтапную многопериодную модель стохастического программирования, разработанную для минимизации как

строительных, так и эксплуатационных затрат при различных сценариях спроса, а также для обеспечения удовлетворенности клиентов. Основной вклад заключается в разработке этой всеобъемлющей модели и внедрении эффективного метаэвристического алгоритма для ее решения, что значительно повышает эффективность вычислений. Эффективность нашего подхода продемонстрирована с помощью численных экспериментов, а анализ чувствительности позволяет получить важные сведения, подчеркивающие практические последствия для развития инфраструктуры HRS. Полученные результаты не только обеспечивают методологический прогресс в выборе местоположения HRS, но и дают ощутимые результаты, которые могут служить руководством для заинтересованных сторон отрасли при принятии стратегических решений, что знаменует собой значительный шаг вперед в устойчивом развитии инфраструктуры водородной энергетики [52].

Gündüz S. B. и соавторы научной статьи «Поиск водородных заправочных станций: сравнительное исследование для Стамбула» заключают, что ископаемые источники энергии истощаются, в то время как потребность в альтернативных источниках энергии растет. Водородная энергетика является важной альтернативой, и ее использование в транспортном секторе с помощью транспортных средств на водородных топливных элементах (HFCV) растет день ото дня. Однако для широкого использования HFCV необходимо создать хорошую инфраструктуру, т.е. водород должен быть доступен. В этом исследовании проанализирована проблема размещения станций заправки водородом (HRS) в Стамбуле, самом многолюдном городе Турции. Проблема решается с помощью модели, охватывающей многопериодный набор данных, и различные плотности населения в городе интегрируются с помощью модификации этой модели. Из-за большого времени вычислений, требуемого многопериодной моделью, охватывающей множество, предложены две эвристические модели, а именно итерационная модель и сокращенная модель. Результаты показывают, что для такого географически обособленного города, как Стамбул, использование

евклидова расстояния может привести к очень радикальным выводам, поэтому его следует избегать. Также показано, что станции HRS расположены в густонаселенных районах, и следует выбирать между общим расстоянием, которое предстоит преодолеть водителям, и расстоянием, которое они будут обслуживать на одной из ближайших станций. В многопериодной системе, где станции открываются постепенно, результаты двух различных эвристических методов выгодны разным заинтересованным сторонам: итеративная модель дает преимущества с точки зрения лиц, принимающих решения, в то время как многопериодная модель с разрывом в оптимальности выгодна с точки зрения клиентов. Представлена модель частичного покрытия, которая представляет собой комбинацию моделей заданного покрытия и р-медианы, для анализа перехода, если спрос удовлетворяется постепенно, а не полностью. Получается, что для удовлетворения высокого спроса достаточно меньшего количества станций, но их количество значительно увеличивается, если удовлетворить весь спрос [18].

По мнению Alshehhi Н. и с группы соавторов научной статьи «Стратегическое размещение альтернативных заправочных станций в ОАЭ» появление транспортных средств, работающих на альтернативном топливе (AFV), к которым относятся, в частности, электромобили на водородных топливных элементах (HFCV) и электромобили на электротяге (EVS), представляет собой многообещающий переход от традиционных двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Автоцистерны предлагают решение проблемы сокращения выбросов парниковых газов, что является насущной проблемой в связи с глобальными климатическими проблемами. Однако широкое внедрение автоцистерн зависит от наличия доступных альтернативных заправочных станций. В данной статье рассматриваются различные способы размещения станций заправки водородом (HRS) для электромобилей FCEV и станций подзарядки электромобилей с наименьшим количеством станций и максимальным охватом. Цель этого документа - решить проблему размещения общедоступных станций на основных магистралях ОАЭ путем создания

первых геопространственных карт, которые послужат дорожной картой для будущего внедрения HRS. Новинка основана на интеграции трех различных моделей расположения — модели заданного покрытия (SCM), позволяющей найти наиболее подходящее количество станций на основе заранее определенного расстояния, модели местоположения с перехватом потока (FILM), позволяющей максимизировать охват с учетом дорожной сети, и модели максимального покрытия (MCM) для максимального охвата, учитывая необходимое количество заправочных станций и используя существующие заправочные станции в ОАЭ. Исследование сосредоточено на выборе оптимальных мест для заправки водородом (HRS) и электростанций (CSs) вдоль основных автомагистралей, соединяющих семь эмиратов. Что касается краткосрочного планирования, то наши результаты иллюстрируют пространственные требования и прогнозируемую потребность в 2-5 часах и 3-11 часах езды в зависимости от различных расстояний [1].

Park J. и соавторы статьи «Текущие проблемы на пути к созданию водородной мобильности для массового рынка с точки зрения первых пользователей в Южной Корее» ожидают, что водородная мобильность станет решающим элементом в борьбе с обугливанием транспорта, работающего на ископаемом топливе. В Южной Корее водородная мобильность успешно сформировала ранний рынок легковых автомобилей на топливных элементах, благодаря активной политике одобрения. Тем не менее, рынок автомобилей на топливных элементах (FCV) все еще находится в зачаточном состоянии, и для выхода на массовый рынок необходимо преодолеть существующие трудности. Целью данного исследования является выявление текущих проблем в распространении FCV в Корее. Определены ключевые проблемы, с которыми сталкиваются FCV с точки зрения потребителей, используя данные последнего опроса клиентов FCV. Полученные данные были использованы для оценки заказанных logit-моделей удовлетворенности автомобилями на топливных элементах и намерений приобрести их. Были выявлены значительные проблемы в Корее с точки зрения транспортных средств,

инфраструктуры и возобновляемых источников энергии. Проблемы, связанные с транспортными средствами, включают опасения по поводу долговечности транспортных средств, такие как отзыв и ремонт, а также затраты на техническое обслуживание и ремонтные работы. Проблемы, связанные с инфраструктурой, включают в себя доступность заправки и сбои в заправке из-за неисправностей на водородных заправочных станциях или проблем с поставками водорода. К числу проблем, связанных с возобновляемой энергетикой, относится низкая доля водорода, получаемого из возобновляемых источников. Для обеспечения широкомасштабного распространения FCV важно поддерживать политику поддержки и привлекать новые потребности в FCV, такие как автомобили большой грузоподъемности для дальних поездок [37].

По мнению Yang C. и соавторов научной статьи «Количественная оценка транспортных средств на топливных элементах и сетей водородных заправочных станций в Китае на основе дорожной карты» автомобили на топливных элементах (FCV) представляют собой передовую автомобильную технологию с нулевым уровнем выбросов, которая будет продвигаться на рынок путем создания эффективной сети водородных заправочных станций (HRSS). В данном исследовании регистрируется и анализируется количество FCV и HRSS в Китае для определения прошлых и будущих сценариев, с акцентом на местоположение HRS и расстояние до заправки FCV. После 2018 года наблюдается снижение соотношения FCV/HRS в связи с интенсивным ростом HRSS, что означает улучшение качества заправки и сокращение расстояния до места заправки. Согласно Дорожной карте Китая, до 2035 года будет построено 5000 заправочных станций. Чтобы оценить расстояние до заправочных станций в 2035 году, предполагается, что количество заправочных станций будет построено в городах с разной численностью населения. Если проектируемые HRSS будут полностью размещены в городах с населением более миллиона человек, расстояние до заправки составит приблизительно 5 км, что соответствует ожиданиям потребителей в

отношении автомобилей, работающих на ископаемом топливе. Расстояние дозаправки может быть дополнительно сокращено до 3 км при условии централизации ограниченного количества HRSS в городах с населением более 5 миллионов человек. Эта работа проливает свет на более осуществимую и применимую стратегию формирования необходимой сети HRS в густонаселенных городских районах в приоритетном порядке для содействия развитию FCV и HRS на текущем этапе [49].

Gao J. совместно с соавторами научной статьи «Исследование оптимизации схемы сети водородных заправочных комплексов на основе использования возобновляемых источников энергии для производства водорода» полагают, что в транспортном секторе транспортные средства на водородных топливных элементах представляют собой наиболее эффективный способ использования водородной энергии. Создание сети водородных заправочных комплексов, охватывающей весь цикл производства, транспортировки и применения водородной энергии, способствует эффективному продвижению транспортных средств на водородных топливных элементах. Однако существующие исследования в основном сосредоточены на производстве водорода и переоборудовании заправочных станций, игнорируя экономические соображения и соображения стабильности, связанные с использованием водородной энергии в полном цикле. В этом исследовании предлагается модель планирования сети водородных заправочных комплексов, использующих водородную энергию на протяжении всего цикла. Во-первых, предлагается модель оценки потребности в водороде, основанная на сценариях использования транспортных средств на водородных топливных элементах, которая уточняет потребности в водороде в каждом сценарии. Затем рассматриваются региональные потребности в водородной энергетике и затраты на строительство водородных заправочных станций с использованием модели комплексного покрытия для оптимизации общей планировки существующих и новых заправочных станций. Наконец, принимая во внимание затраты на поставку водорода в пункты производства

водорода из возобновляемых источников энергии и стабильность поставок в регионе, строится модель планирования сети объектов заправки водородом. В качестве примера был выбран регион Пекин-Тяньцзинь-Хэбэй, где создается крупномасштабная сеть поставок водорода, основанная на производстве, транспортировке и использовании водорода из возобновляемых источников энергии [15].

В научной статье «Оптимизация модели планирования водородных магистралей с учетом затрат на водород и влияния потока транспортных средств» Zhang Y. и соавторы провели исследование и установили, что в последние годы правительства стран всего мира активно выступают за внедрение транспортных средств на водородных топливных элементах (HFCV) в качестве средства обеспечения более устойчивого развития транспорта в будущем. Однако широкое внедрение этих транспортных средств требует надежной поддержки инфраструктуры гидрогенизации. В этой статье представлена новая модель планирования оптимизации водородных магистралей, разработанная специально для стратегического размещения водородных заправочных станций (HRS) вдоль автомагистралей. Основанный на традиционных моделях выбора площадки для HRS, этот инновационный подход объединяет факторы, связанные с закупкой, транспортировкой и использованием водорода. Модель оптимизирует местоположение, масштаб HRS и количество распределителей водорода в течение каждого HRS, используя в качестве целевой функции минимальную удельную стоимость водорода. Для проверки эффективности предложенная модель была применена в регионах Пекин-Тяньцзинь-Хэбэй (ВТН) и Чунцин, при этом было проведено планирование местоположения как на этапе демонстрации, так и на этапе продвижения, и были получены конкретные результаты планирования. Это исследование дает ценную информацию о планировании водородной инфраструктуры вдоль автомобильных дорог и служит ориентиром для будущих усилий в этой области [51].

Tamimuddin T. F. совместно с соавторами научной статьи «Обзор

конструкции, эксплуатации и выравнивания затрат на водородные заправочные станции для электромобилей на топливных элементах» считают, что интерес к водородной экономике быстро растет, и развитые страны стремятся смягчить совокупные последствия нестабильного рынка ископаемого топлива и загрязнения окружающей среды. Транспортный сектор является ключевой областью для перехода от ископаемого топлива к экологически чистому водородному топливу. Технология электромобилей на топливных элементах (FCEV) была усовершенствована и успешно протестирована на широком спектре транспортных платформ. Для того чтобы FCEV стал коммерчески выгодным, важным фактором является наличие водородных заправочных станций (HRS) по доступной цене. В этой статье представлен общий обзор экономики водородного транспорта для заинтересованных сторон, политиков и инвесторов, который облегчит принятие обоснованных решений. В нем рассматриваются вопросы расширения проектов и эксплуатации HRS, основанные на концепции экологически чистой энергетики, направленной на повышение уровня использования водорода (LCOH). Общеизвестно, что успех внедрения "зеленых часов" в достижении целевых показателей LCOH в значительной степени зависит от стоимости источника энергии, где солнечная энергия и энергия ветра являются основными решениями в настоящее время. По мере появления новых экономически эффективных технологий, компания LCO демонстрирует заметное сокращение, а также уделяет больше внимания оптимизации операций. В обзоре сделан вывод о том, что green HRS способна достичь коммерчески привлекательного результата в течение пяти - десяти лет, главным образом, за счет оптимизации операционной стратегии [48].

Grube T. и Rex M. в научной статье «Внедрение автомобилей на топливных элементах в дорожный транспорт и расширение сети водородных заправочных станций: обновление к 2024 году» задаются целью представить обзор текущего состояния автомобильных транспортных средств на топливных элементах и инфраструктуры водородных заправочных станций на

основе всеобъемлющей инициативы по сбору и анализу данных, проводимой Программой технологического сотрудничества Международного энергетического агентства (МЭА) в области передовых топливных элементов. Как и в предыдущих версиях, данные были собраны за период до конца декабря, в данном случае за 2023 год, чтобы предоставить обновленную информацию за 2024 год. Наш сбор данных показывает, что парк автомобилей на топливных элементах, который в настоящее время приближается к 90 000 единиц, заправляется с помощью сети из более чем 1200 водородных заправочных станций. Как и в предыдущие годы, собранные данные свидетельствуют о том, что Южная Корея продолжает лидировать в мировом автопарке. На долю этой страны приходится почти 40% от общего количества автомобилей на топливных элементах и половина легковых автомобилей на топливных элементах. Кроме того, 93% всех автомобилей на топливных элементах эксплуатируются всего в четырех странах, при этом в автопарке преобладают легковые автомобили, на долю которых приходится 75% от общего числа. Обновление, опубликованное в этом году, также свидетельствует о продолжающемся значительном росте числа большегрузных автомобилей. По количеству водородных заправочных станций Китай снова лидирует, за ним следуют Южная Корея и Япония, в результате чего на азиатском континенте насчитывается более 800 заправочных станций. В целом, в 2023 году количество водородных заправочных станций еще раз значительно увеличилось за всю историю наблюдений [17].

В научной статье «Подход к планированию инфраструктуры снабжения водородом, зависящий от принятия решений, с учетом причинно-следственной связи между транспортными средствами и станциями» Deng H. и соавторы приходят к выводу, что на ранней стадии коммерциализации транспортных средств на водородных топливных элементах (HFCV) разумное планирование инфраструктуры снабжения водородом (HSI) является предпосылкой для популяризации HFCV. Однако существует четкая

взаимосвязь между HFCV и водородозаправочными станциями (HRSS): решения HRSS по планированию могут повлиять на спрос на водородозаправочные станции для HFCV, а рост спроса, в свою очередь, будет стимулировать дальнейшие инвестиции в HRSS, что обусловлено головоломкой "курица-яйцо". В то же время, существует противоречие в затратах между энергетическим планированием и удобством заправки водородом в HFCV, вызванное планированием местоположения HSS. С этой целью в данной работе была разработана модель многосетевого планирования HSI, координирующая водородные, энергетические и транспортные сети. Затем, чтобы эффективно отразить причинно-следственную связь между HFCV и HRSS на ранней стадии планирования инвестиций в водородную инфраструктуру при отсутствии достаточных исторических данных, была разработана неопределенность, зависящая от спроса на водород (DDU), и устойчивая к распределению система оптимизации. Неопределенность спроса на водород моделируется как набор неопределенностей Вассерштейна с эмпирическим распределением вероятностей, зависящим от принятия решения. Впоследствии, чтобы уменьшить вычислительную сложность, вызванную введением большого количества сценариев и многомерных нелинейных ограничений, разработан улучшенный метод формирования распределения и методы сокращения сценариев и переменных для получения разрешимой формы с меньшей вычислительной нагрузкой. Наконец, результаты моделирования показывают, что этот метод может снизить затраты как минимум на 7,7% по сравнению с традиционными методами и будет более эффективным в вопросах крупномасштабного планирования HSI. Кроме того, подготовлены эффективные предложения для разработчиков политики и инвесторов [11].

В научной статье Kim C. и соавторов «Обзор водородной инфраструктуры: текущее состояние и стратегия внедрения» было проанализировано текущее состояние инфраструктуры поставок водорода, чтобы понять прогресс на пути к созданию водородного общества. Сначала

была проанализирована инфраструктура поставок водорода. Преобладающее количество (96 процентов) водорода производится из ископаемого топлива, при этом наиболее широко используется метод паровой конверсии метана. Водород обычно хранится в виде сжатого газа и транспортируется на заправочные станции потребителю с помощью прицепов-тюбингов или трубопроводов, в зависимости от расстояния доставки. Далее были рассмотрены характеристики водородной инфраструктуры в странах. Каждая страна стремится производить и поставлять водород, используя существующие промышленные мощности. США и Япония производят водород путем переработки природного газа (ПГ) более чем на 90% и транспортируют газ по действующим трубопроводам. В то время как ЕС производит водород из возобновляемых источников энергии и рассматривает возможность импорта газа из стран-членов ЕС. Была представлена стратегия внедрения в Корею в качестве руководства для стран-новичков. Корея в основном производит водород в качестве побочного продукта на существующих заводах по производству сжиженного газа, а также импортирует сжиженный водород из-за рубежа. Поскольку большая часть водорода транспортируется по трубопроводам, он неравномерно распределен по всей стране. Попытки устранить этот дисбаланс в поставках водорода будут заключаться в применении водородных экстракторов на местных заводах или разработке технологий электролиза. Правительство Кореи предлагает субсидии, чтобы стимулировать участие частных компаний в расширении строительства водородных заправочных станций. С помощью этой поддержки правительство пытается снизить цену на водородный газ до 2500 вон/кг до 2050 года. Наши результаты отражают текущее состояние развития водородного общества и могут быть использованы для разработки рекомендаций по разработке надлежащих стратегий использования водородного топлива для стран [22].

Аналогичные исследования были проведены отечественными специалистами: [54, 57, 58].

Список использованной литературы

1. Alshehhi H. et al. Strategic placement of alternative fueling stations in the UAE //Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – №. 1. – С. 11699.
2. Awan M. A., Scorrano M. The Cost Competitiveness of Electric Refrigerated Light Commercial Vehicles: A Total Cost of Ownership Approach //Future Transportation. – 2025. – Т. 5. – №. 1. – С. 10.
3. Baek K. H. et al. The Analysis of Vehicle Electrification and Fuel Switching Technology Deployment for Light-Duty and Medium-and Heavy-Duty Vehicles: The Projection of the Total Cost of Ownership (Tco) from 2021 to 2050 //Available at SSRN 5005438.
4. Burke A. F., Zhao J., Fulton L. M. Projections of the costs of light-duty battery-electric and fuel cell vehicles (2020–2040) and related economic issues //Research in Transportation Economics. – 2024. – Т. 105. – С. 101440.
5. Camilleri R. Assessing the feasibility and implications of electric vehicle adoption in the modern era: a risk feasibility study on infrastructure and cost effectiveness in Malta : дис. – University of Malta, 2024.
6. Chen S. et al. Learning-Aided Collaborative Optimization of Power, Hydrogen, and Transportation Networks //Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2024.
7. Chen Z., Wang H. Total cost of ownership analysis of fuel cell electric bus with different hydrogen supply alternatives //Sustainability. – 2023. – Т. 16. – №. 1. – С. 259.
8. Cheon S. et al. Finding the most suitable vehicle type for projected years using analytic hierarchy process integrated with economic and environmental aspects //Journal of Cleaner Production. – 2023. – Т. 426. – С. 139075.
9. Danielis R. et al. The Economic Feasibility of Battery Electric Trucks: A Review of the Total Cost of Ownership Estimates //Energies. – 2025. – Т. 18. – №. 2. – С. 429.

10. Dehaye M., Agrell P. J. What is the optimal sequence of hydrogen development for heavy duty vehicle in Belgium?.

11. Deng H. et al. A decision-dependent hydrogen supply infrastructure planning approach considering causality between vehicles and stations //IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2024.

12. Deng H. et al. A New Decision-Dependent Dro Framework Considering Indirect Network Effects for Hydrogen Supply Infrastructure Expansion Planning //Available at SSRN 5197655.

13. Deng H. et al. Hydrogen Supply Infrastructure Planning Method Considering Indirect Network Effects //2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – IEEE, 2024. – C. 654-661.

14. Eze V. H. U. et al. Navigating the road to sustainable mobility: opportunities and challenges in electric vehicle adoption in Liberia //Discover Electronics. – 2025. – T. 2. – №. 1. – C. 18.

15. Gao J. et al. Research on optimization layout of hydrogen refueling facility network based on renewable energy hydrogen production mode //Energy. – 2024. – T. 296. – C. 131166.

16. Gao Z. et al. Location and capacity of urban hydrogen refueling station based on a capacitated deviation-flow capturing location model //International Journal of Green Energy. – 2025. – C. 1-11.

17. Grube T., Rex M. Deployment of Fuel Cell Vehicles in Road Transport and the Expansion of the Hydrogen Refueling Station Network: 2024 Update //AFC TCP (IEA (International Energy Agency) Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme). – 2024.

18. Gündüz S. B., Geçici E., Güler M. G. Locating hydrogen fuel stations: A comparative study for Istanbul //International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – T. 52. – C. 1234-1246.

19. Hu S. et al. The Research on The Total Ownership Costs for Hydrogen Fuel Cell Commercial Vehicles Based on System Dynamics //Proceedings of the

2024 International Conference on Big Data and Digital Management. – 2024. – С. 380-386.

20. Jiang L., Wang L. A Bi-Level Optimization Model for Hydrogen Station Location Considering Hydrogen Cost and Range Anxiety //Sustainability. – 2025. – Т. 17. – №. 7. – С. 3210.

21. Kennington L. A Techno-Economic Analysis of Hydrogen, Electric, and Diesel Fuel in Medium-and Heavy-Duty Transportation Applications : дис. – Massachusetts Institute of Technology, 2023.

22. Kim C. et al. Review of hydrogen infrastructure: the current status and roll-out strategy //International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Т. 48. – №. 5. – С. 1701-1716.

23. Kraal D. et al. Zero-Emissions Transport: Taxation Support for Business Electric Cars //A Just Transition to Decarbonisation: Themes of Loss and Damage, Transport, Nature and Youth. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – С. 43-68.

24. Kumar D., Kalghatgi G., Agarwal A. K. Comparison of economic viability of electric and internal combustion engine vehicles based on total cost of ownership analysis //Transportation Systems Technology and Integrated Management. – 2023. – С. 455-489.

25. Magnino A. et al. Total cost of ownership analysis for hydrogen and battery powertrains: A comparative study in Finnish heavy-duty transport //Journal of Energy Storage. – 2024. – Т. 99. – С. 113215.

26. Mahalana A., Yang Z., Posada F. The consumer cost of ownership of electric passenger cars in Indonesia [Электронный ресурс].

27. Mann R. F. Driving Transformation: Tax Strategies for Electrifying Light Duty Transportation //Environmental Law Reporter. – 2023. – Т. 53. – №. 10298.

28. Martins H. et al. Assessing policy interventions to stimulate the transition of electric vehicle technology in the European Union //Socio-Economic Planning Sciences. – 2023. – Т. 87. – С. 101505.

29. MÉNDEZ C. et al. HYDROGEN MOBILITY FOR QATAR: A COMPARISON BETWEEN CONVENTIONAL, ELECTRIC AND HYDROGEN FUEL CELL VEHICLES USING LIFE CYCLE COST ANALYSIS //WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2024. – T. 262. – C. 347-351.

30. Mendez C. et al. Hydrogen Vehicles for Qatar: Optimizing Incentives Through a Life Cycle Cost Analysis //Available at SSRN 5052381.

31. Meng X. et al. Optimal Planning of Hydrogen Refueling Stations Considering Balanced Utilization of Resources //International Conference on Electrical and Electronics Engineering. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. – C. 163-175.

32. Möring-Martínez G., Senzeybek M., Jochem P. Clustering the European Union electric vehicle markets: A scenario analysis until 2035 //Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2024. – T. 135. – C. 104372.

33. Mu Z. et al. Evaluating fuel cell vs. battery electric trucks: Economic perspectives in alignment with china's carbon neutrality target //Sustainability. – 2024. – T. 16. – №. 6. – C. 2427.

34. Nakamoto Y., Tokito S., Hanaka T. Strategic roadmap for optimising vehicle emission reductions and electrification //Environmental Research Letters. – 2024. – T. 19. – №. 5. – C. 054016.

35. Nelson Edberg M. Efficient Fiscal Policies for the Transition to Electric Vehicles (EV) in Sweden. – 2024.

36. Oni O. E., Longe O. M. A Study on Electric Vehicle Footprint in South Africa //Energies. – 2024. – T. 17. – №. 23. – C. 6086.

37. Park J., Kim C. Current Challenges to Achieving Mass-Market Hydrogen Mobility from the Perspective of Early Adopters in South Korea. – 2025.

38. Peng M. et al. Collaborative Planning of Hydrogen Refuelling Stations and Drgs in Adn for Distributed Energy Consumption and Flexibility Enhancement //Available at SSRN 5174272.

39. Pfaffenbichler P. et al. Simulating the effects of tax exemptions for plug-in electric vehicles in Norway //European Transport Research Review. – 2024. – T. 16. – №. 1. – C. 26.

40. Qadir S. A. et al. Navigating the complex realities of electric vehicle adoption: A comprehensive study of government strategies, policies, and incentives //Energy Strategy Reviews. – 2024. – T. 53. – C. 101379.

41. Qin Z. et al. A Comparative Durability Cost Analysis of Internal Combustion Engine, Electric and Fuel Cell Vehicles. – SAE Technical Paper, 2025. – №. 2025-01-7074.

42. Reddy V. J. et al. Sustainable vehicles for decarbonizing the transport sector: a comparison of biofuel, electric, fuel cell and solar-powered vehicles //World Electric Vehicle Journal. – 2024. – T. 15. – №. 3. – C. 93.

43. Sarkar S. et al. Techno-Economic Assessment of Future Fuels and Vehicle Technologies: Fuel Cell, Batteries, and Natural Gas Prospects in India. – SAE Technical Paper, 2023. – №. 2023-01-0234.

44. Sontakke U. R., Jaju S., Mahajan D. K. Total cost of ownership analysis of fuel cell electric vehicles in India //Towards Hydrogen Infrastructure. – Elsevier, 2024. – C. 379-400.

45. Soszynska P. et al. Driving the future: an analysis of total cost of ownership for electrified vehicles in north america //World Electric Vehicle Journal. – 2024. – T. 15. – №. 11. – C. 492.

46. Sun R., Sujana V. A., Jatana G. Systemic Decarbonization of Road Freight Transport: A Comprehensive Total Cost of Ownership Model //arXiv preprint arXiv:2410.21026. – 2024.

47. SZULC T., KRAWCZYK G. TOTAL COST OF OWNERSHIP OF FUEL CELL (FCEV) AND ELECTRIC (EV) BUSES IN DELIVERY OF PUBLIC TRANSPORTATION SERVICES ON THE EXAMPLE OF UPPER-SILESIA AND ZAGLEBIE METROPOLIS //Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization & Management/Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie. – 2023. – №. 190.

48. Tamimuddin T. F. et al. An Overview on the Design, Operation and Levelized Costs of Hydrogen Refuelling Stations for Fuel Cell Electric Vehicles //Journal of Applied Engineering Design and Simulation. – 2024. – Т. 4. – №. 1. – С. 21-34.

49. Yang C., Hu Q. Quantifying fuel cell vehicles and hydrogen refueling station networks in China based on roadmap //Energy for Sustainable Development. – 2023. – Т. 76. – С. 101265.

50. Zhang Q., Ihara T. Comparative cost analysis of FCVs, BEVs, and ICVs: A consumer perspective in Japan //Applied Energy. – 2025. – Т. 382. – С. 125231.

51. Zhang Y. et al. Optimizing Hydrogen Highway Planning Model Considering Hydrogen Cost and Vehicle Flow Effects //2024 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). – IEEE, 2024. – С. 241-246.

52. Zhen L. et al. Hydrogen refueling station location optimization under uncertainty //Computers & Industrial Engineering. – 2024. – Т. 190. – С. 110068.

53. Александрина Юрьевна Скороход, Кирилл Дмитриевич Хабаров ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ // Известия СПбГЭУ. 2023. №6-2 (144). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-infrastruktury-dlya-elektromobiley-v-g-sankt-peterburg> (дата обращения: 06.05.2025).

54. Арина Юрьевна Кудревич ОЦЕНКА ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ДОСТУПНОСТИ ЭЛЕКТРОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ В РЕГИОНАХ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ В ЦЕЛЯХ ТУРИЗМА // Вопросы территориального развития. 2023. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-infrastrukturnoy-dostupnosti-elektrozapravochnyh-stantsiy-v-regionah-severo-zapada-rossii-v-tselyah-turizma> (дата обращения: 02.05.2025).

55. Барабошкина А. В. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ И ЭКСТЕРНАЛЬНЫХ ИЗДЕРЖЕК ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ И АВТОМОБИЛЯ С ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО

СГОРАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА МОСКВЫ) // Экономика и управление. 2023. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitel'naya-otsenka-konkurentosposobnosti-i-eksternalnyh-izderzhek-elektromobilya-i-avtomobilya-s-dvigatelem-vnutrennego> (дата обращения: 01.05.2025).

56. Барабошкина Анастасия Валерьевна, Кудрявцева Ольга Владимировна Оценка конкурентоспособности российского электромобиля как обоснование необходимости стимулирования рынка электромобилей в России // Russian Journal of Economics and Law. 2023. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-konkurentosposobnosti-rossiyskogo-elektromobilya-kak-obosnovanie-neobhodimosti-stimulirovaniya-rynka-elektromobiley-v> (дата обращения: 01.05.2025).

57. Г В. Бабаян РОЛЬ ЭЛЕКТРОЗАПРАВOK В ПЕРЕХОДЕ К УГЛЕРОДНО-НЕЙТРАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ: ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ И ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ В КАЛИФОРНИИ И ЛОНДОНЕ // Экономика и бизнес: теория и практика. 2024. №10-1 (116). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-elektrozappravok-v-perehode-k-uglerodno-neytralnoy-ekonomike-zakonodatelnye-i-infrastrukturnye-aspekty-v-kalifornii-i-londone> (дата обращения: 02.05.2025).

58. Денисов Илья Владимирович ЗАРЯДНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА: ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ПАРКА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ // ТТПС. 2024. №3 (69). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaryadnaya-infrastruktura-elektricheskogo-transporta-prognoznaya-otsenka-dinamiki-razvitiya-parka-elektromobiley-v-rossiyskoj> (дата обращения: 02.05.2025).

59. Макарова Ирина Александровна Россия на пути экологизации транспортного и топливного налога // Вестн. Том. гос. ун-та. Экономика. 2015. №4 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rossiya-na-puti-ekologizatsii-transportnogo-i-toplivnogo-naloga> (дата обращения: 06.05.2025).

60. Ростовский Йоханнес-Корнелиус, Чакватадзе Важа Вахтангович КАК СТАЛА ВОЗМОЖНА ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ В

НОРВЕГИИ // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2023. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kak-stala-vozmozhna-elektromobilnaya-revolyutsiya-v-norvegii> (дата обращения: 01.05.2025).