

Международный опыт управления инновациями в области водородной энергетики на транспорте

International experience of innovation management in hydrogen transportation

doi 10.26310/2071-3010.2020.263.9.006



С. В. Ратнер,
д. э. н., доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления РАН
✉ lanarat@mail.ru

S. V. Ratner,
PhD, assistant professor, leading researcher, Institute of control sciences, Russian academy of sciences



В. В. Иосифов,
к. т. н., доцент, Кубанский государственный технологический университет
✉ iosifov_v@mail.ru

V. V. Iosifov,
PhD, assistant professor, Kuban state technological university

Развитие водородной энергетики для России является одним из наиболее перспективных способов сохранения лидирующих позиций на мировых энергетических рынках в ситуации снижения спроса на основные углеводороды. В настоящей работе проводится анализ уровня развития технологии водородной энергетики в транспортном секторе, а также опыта управления инновациями в данной сфере, позволяющего обеспечить успешное преодоление инфраструктурных, финансовых, нормативно-правовых и иных барьеров на пути развития данных технологий. Методологической основой проводимого анализа явились теория кривых обучения (learning-by-doing) и теория эффекта масштаба производства. В результате изучения мирового опыта снижения стоимостных барьеров внедрения технологий водородной энергетики на наземном и морском транспорте делаются выводы о наиболее коммерчески привлекательных способах синхронизации развития парка транспортных средств и зарядочной инфраструктуры.

The development of hydrogen energy for Russia is one of the most promising ways to maintain a leading position in the world energy markets in a situation of decreasing demand for basic hydrocarbons. This paper analyzes the level of development of hydrogen energy technology in the transport sector, as well as the experience of managing innovation in this area, which makes it possible to successfully overcome infrastructure, financial, regulatory and other barriers to the development of these technologies. The methodological basis of the analysis is the theory of learning curves (learning-by-doing) and the theory of economies of scale. As a result of studying the world experience in reducing the cost barriers to the introduction of hydrogen energy technologies in land and sea transport, conclusions are drawn about the most commercially attractive ways to synchronize the development of the vehicle fleet and charging infrastructure.

Ключевые слова: водородная энергетика, инновации, топливные элементы, наземный транспорт, морской транспорт.

Keywords: hydrogen energy, innovation, fuel cells, land transport, maritime transport.

Введение

Замедление темпов роста мировой экономики, изменение структуры потребления и снижение спроса на традиционную продукцию топливно-энергетического комплекса (ТЭК), перепроизводство углеводородных энергетических ресурсов создают серьезные угрозы для развития российской экономики, существенно зависящей от ТЭК. Несмотря на попытки государства найти новые точки роста российской экономики, доля ТЭК в инвестициях в основной капитал до сих пор составляет около трети кумулятивного объема инвестиций в основной капитал в Российской Федерации, в структуре доходов федерального бюджета — около 40%, а в российском экспорте — более 50% в стоимостном выражении. Объемы добычи и производства энергетических ресурсов, производство топлива и электрической энергии в Российской Федерации устойчиво превышают внутреннее потребление по всем основным позициям: по нефти более чем в 1,9 раза, газу — в 1,5 раза, углю — в 1,8 раза, дизельному топливу — в 2,6 раза, автомобильному бензину — в 1,1 раза [1].

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г. (Утверждена распоряжением Правительства РФ № 1523-р от 9.06.2020 г., сохранение экспортного потенциала России на мировом рынке нефти и нефтепродуктов планируется обеспечить за счет прогнозируемого роста потребле-

ния в транспортном секторе, который должен компенсировать ожидаемое снижение спроса в бытовом и коммерческом секторах, а также электроэнергетике. Однако ускоренное развитие электромобилей и других транспортных средств на электротяге и других альтернативных видах топлива (например, на водороде) может пойти гораздо более быстрыми темпами, чем ожидалось ранее за счет более активной поддержки этих технологий развитыми странами, пытающимися и изменить традиционную расстановку сил на мировых энергетических рынках [2]. Поэтому мониторинг динамики развития инновационных технологий в области транспорта и прогнозирование его последствий для мирового рынка топливно-энергетических ресурсов является актуальной научно-практической задачей.

В данной работе проводится анализ уровня развития технологии водородной энергетики в транспортном секторе, а также опыта управления инновациями в данной сфере, позволяющего обеспечить успешное преодоление инфраструктурных, финансовых, нормативно-правовых и иных барьеров на пути развития данных технологий. Методологической основой проводимого анализа явились теория кривых обучения (learning-by-doing) [3] и теория эффекта масштаба производства [4, 5], на основе которых рассматривались возможности быстрого распространения инновационных технологий в области водородного транспорта на внутренних рынках отдельных стран и в целом на мировом

рынке. Информационной базой исследования являются материалы Международного энергетического агентства (МЭА) [6-8], а также работы российских и зарубежных ученых в области экономики возобновляемой энергетики.

Водородные технологии в секторе автотранспорта

В настоящее время использование водорода в качестве топлива чаще всего встречается в пассажирских автомобилях, в то же время как перспективные направления рассматриваются водородные грузовые автомобили, автобусы, а также погрузочно-разгрузочное оборудование. К началу 2019 г. количество водородных пассажирских автомобилей, эксплуатируемых в мире, достигло 11200 шт., причем в 2018 г. было продано 4000 водородных автомобилей, что на 56% больше, чем в предыдущем 2017 г. [6]. Данные по 2019 г. пока что недоступны в открытых источниках, однако ожидается, что показатель годовых продаж будет еще выше. Однако по сравнению с количеством электромобилей (более 5,1 млн шт. в 2018 г.), а тем более по количеству с общим количеством эксплуатируемых в мире автомобилей (около 1 млрд), это пока что совершенно незначительная цифра [8]. Несмотря на то, что первый пассажирский водородный автомобиль Hyundai Tucson ix35 был выведен на рынок еще в 2013 г., а Toyota Mirai — в 2017 г., высокая цена автомобиля и отсутствие развитой заправочной инфраструктуры стали существенными сдерживающими факторами их дальнейшего развития.

Сегодня около половины всего количества водородных автомобилей зарегистрировано в США (преимущественно, штат Калифорния), примерно четверть — в Японии, 11% — в Евросоюзе (в основном, в Германии и Франции) и еще 8% — в Южной Корее. Практически все эксплуатируемые водородные пассажирские автомобили произведены компаниями Тойота, Хонда или Хендай. Мерседес в последние 2 года также выпустил ограниченное количество водородных автомобилей.

В стратегических планах Тойоты намечено существенное расширение объемов производства водородных автомобилей вплоть до 30000 штук ежегодно, начиная в 2021 г. На начало 2019 г. объем производства составлял всего 3000 автомобилей на водороде. Хендай анонсировал план по увеличению объемов производства автомобилей на водороде с 3000 штук в 2018 г. до 700000 штук к 2030 г.

Количество погрузчиков, работающих на водородном топливе, по оценкам МЭА к началу 2019 г. составило более 25 тыс. На производстве они рассматриваются как альтернатива обычным электропогрузчикам [6].

Что касается автобусов, то в настоящее время лидером по использованию автобусов на водородном топливе является Китай, в котором уже в настоящее время их парк составляет более 4 тыс. шт. Около 50 автобусов на водородном топливе эксплуатируется в Европе, около 30 — в США [7]. За период 2018-2020 гг. в Корее и Японии было реализовано несколько демонстрационных проектов по развитию водородных автобусов, однако по их результатам статистика

пока что отсутствует. В перспективе Корея планирует ввести в эксплуатацию 1000 автобусов на водородном топливе к 2020 г. и довести их количество до 40000 к 2040 г. [6]. Учитывая тот факт, что в настоящее время парк автобусов на природном газе насчитывает около 26000 единиц, предполагается их полный перевод на водород. Япония планировала ввести в Токио 100 автобусов на водородном топливе к Олимпийским играм 2020 г., но настолько пандемия COVID-19 помешала этим планам — пока нет доступной информации.

Автобусы на водородном топливе имеют явные преимущества перед электроавтобусами в том случае, если требуется длинный дневной пробег без подзарядки (более 200 км) или маршруты автобуса являются гибкими (сокращаются или удлиняются в зависимости от транспортной ситуации и сезона). Кроме того, если парк автобусов велик, то для его подзарядки от электричества требуется длительное время [9]. Заправка водородным топливом в этом случае имеет явные преимущества, так как осуществляется быстро. Более 11 компаний в мире в настоящее время занимаются производством водородных автобусов.

В секторе грузовых автомобилей на водородном топливе явным лидером является Китай, в котором в настоящее время реализуется большинство демонстрационных проектов. По данным 2018 г. в стране эксплуатировалось более 400 тяжелых грузовых автомобилей на водородном топливе и более 10 легких [9]. Что касается других стран, то можно отметить использование грузовых водородных автомобилей компаниями по доставке грузов FedEx и UPS в США, логистическими и почтовыми компаниями Франции, а также реализацию демонстрационного проекта h2Share по тестированию 27-тонного грузовика в Европе [6].

Из производителей грузовиков на водородном топливе можно отметить Hyundai, Scania, Toyota, Volkswagen, Daimler и Groupe PSA, которые разрабатывают различные модели, а также новые компании, например, компания Nikola Motor Company, основанная в 2014 г. Из них Hyundai и Nikola имеют больше всего предзаказов. В партнерстве с H2 Energy Hyundai планирует поставить 1600 электромобилей на топливных элементах в Швейцарию и другие страны Европы к 2025 г. [10]. Nikola получила значительное финансирование и большое количество предварительных заказов для своих грузовиков, в том числе на недавно представленную европейскую модель Nikola Tre [6]. И Hyundai, и Nikola а принимают непосредственное участие в производстве водорода (в основном, с помощью возобновляемой электроэнергии), чтобы обеспечить полный топливный цикл потребителя. Toyota сотрудничает с Калифорнийским советом по воздушным ресурсам и портам в испытании грузовика класса 8. Кроме того, логистические компании FedEx, UPS и DHL тестируют автомобили с увеличенным запасом хода на топливных элементах. Логистическая компания StreetScooter (принадлежит Deutsche Post DHL Group) планирует расширить линейку грузовых автомобилей на топливных элементах к 2020 г.

Развитие инфраструктуры зарядных станций для водородных автомобилей пока также существенно отстает от развития подобной инфраструктуры для

электромобилей. Однако в последние годы темпы роста зарядной инфраструктуры для водородных автомобилей существенно возросли. По данным на начало 2019 г. количество зарядных станций для водородных автомобилей во всем мире составляло всего 381 шт. Из них 100 шт. было установлено в Японии, 69 шт. в Германии, и 63 шт. в США. Для сравнения, количество общедоступных быстрых зарядных станций для электромобилей в 2018 г. составило 144 тыс., медленных — 395 тыс., а количество частных зарядных точек для электромобилей превысило цифру 4,7 млн [7]. Это означает, что в среднем на 10 электромобилей приходится 1 общедоступная зарядная станция, и почти на каждый электромобиль — одна частная. Необходимая плотность инфраструктуры подзарядки для водородных автомобилей гораздо ниже. В Японии в настоящее время на одну общедоступную зарядную станцию приходится 25 водородных автомобилей, в США — 90, в Китае — 58, в Корее — 63. В Германии и Франции на одну зарядную станцию пока приходится меньше всего водородных автомобилей (8-18), так как эти страны пока находятся только в начале пути развития водородного транспорта. По экспертным оценкам, развитая инфраструктура подзарядки водородных автомобилей может иметь плотность 2500-3500 автомобилей на одну зарядную станцию.

Показатели плотности инфраструктуры подзарядки существенным образом влияют на конечную стоимость водородного топлива для потребителя (стоимость на месте зарядки). Например, плотность 10 автомобилей на одну зарядку (как в настоящее время в Европе) означает, что заправочная станция эксплуатируется менее, чем на 10% с общим объемом перекачки водорода примерно около 50 кг в день. Стоимость строительства и содержания одной станции в пересчете на объем отпускаемого топлива при таких условиях оценивается примерно в \$15-25 на 1 кг водорода [6]. С увеличением количества автомобилей, обслуживаемых одной станцией, эта стоимость снижается, что положительным образом сказывается на цене водородного топлива для потребителя. Следует заметить, что страны с более высоким отношением количества автомобилей на зарядную станцию, например, Китай, пока не могут служить хорошим примером для оценки вклада стоимости содержания инфраструктуры в общую цену топлива, так как в них водородные автомобили эксплуатируются преимущественно государственными и частными корпорациями на фиксированных маршрутах.

Большой разброс в значения плотности существующей заправочной инфраструктуры в разных странах говорит о том, что в них используются разные подходы к управлению рисками развития этой инфраструктуры. Для того, чтобы увеличить координацию между развитием инфраструктуры и автомобильного парка, а также сократить временной лаг между строительством заправочной станции и вводом ее в постоянную эксплуатацию, во многих странах предпочитают размещения заправочных станций в непосредственной близости от площадок по производству водорода и используют их для обслуживания постоянного парка автомобилей (например, городских автобусов или

транспорта, используемого непосредственно на производстве).

Теоретический потенциал использования водорода в секторе автомобильного транспорта огромен. Современный уровень развития техники позволяет перевести на использование водорода все виды автомобиля, либо посредством топливных элементов, либо использованием топлива на основе водорода в двигателях внутреннего сгорания. Если предположить, что весь 1 млрд автомобилей, который используется в настоящее время на дорогах мира, а также 190 млн грузовиков и 25 млн автобусов будут использовать водород в качестве топлива, что мировой спрос на водород может достичь 300000 т в год. Это более чем в четыре раза превышает текущий мировой спрос на чистый водород. Кроме того, учитывая тренды растущей автомобилизации в развивающихся странах, к 2030 г. спрос на топливо со стороны наземного транспорта по оценкам экспертов должен увеличиться примерно на 10% [6-8]. В настоящее время уровень автомобилизации населения в таких странах, как Индия и Китай, в разы ниже, чем в Европейском союзе и США. Например, количество автомобилей на душу населения в Индии в 25 раз меньше аналогичного показателя в США. Кроме того, увеличение спроса на моторное топливо ожидается со стороны грузового транспорта в развивающихся экономиках.

Однако несмотря на высокий потенциал развития водородного транспорта, его реальные масштабы будут существенным образом зависеть от динамики затрат на само транспортное средство, расходов на топливо, стоимости альтернатив и развитие потребительских паттернов мобильности в разных странах. Также следует отметить, что с точки зрения потребителя стоимость автомобиля — это лишь один из многих критериев принятия решения о покупке. Как правило, покупатель автомобиля рассматривает доступные альтернативы по ряду критериев, включая производительность, комфорт, ожидаемую надежность и бренд. Другими словами, выбор автомобиля — это не просто вопрос цены, даже если рассматривать полную стоимость владения и эксплуатации транспортного средства. И электромобили, и автомобили на топливных элементах имеют некоторые общие эксплуатационные характеристики, такие как нулевые выбросы, быстрый старт с места, бесшумная работа, что может быть привлекательным для потребителя. У них также есть некоторые различные характеристики в производительности, которые могут удовлетворить разброс в потребностях отдельных групп потребителей (например, потребителей, использующих автомобиль только в городской черте, и потребителей, совершающих преимущественно дальние поездки).

Не считая стоимости водородного топлива, конкурентоспособность прямого использования водорода в автомобилях на топливных элементах зависит от того, насколько могут быть снижены три критических компонента стоимости: стоимость топливных элементов, стоимость хранения водорода на борту автомобиля и стоимость заправки.

Несмотря на то, что за последнее десятилетие стоимость топливных элементов значительно снизи-

лась [11], она все еще остается высокой, а объемы производства низкими. Текущая коммерческая стоимость типового топливного элемента по экспертным оценкам составляет \$230 за 1 кВт, хотя в ближайшем будущем благодаря использованию новых технологий в производственном процессе эта цифра может снизиться до \$180 за 1 кВт [12]. Перспективным направлением исследований по развитию технологий топливных элементов являются работы в области повышения активности катализатора, что позволяет снизить содержание платины — одного из наиболее дорогих компонентов топливного элемента, а также разработки в области не содержащих платину катализаторов. Актуальными также являются исследования по оптимизации конструкции компонентов топливных элементов и снижению стоимости биполярных пластин.

Кроме того, стоимость топливных элементов может быть значительно снижена благодаря экономии на масштабе, т. е. за счет увеличения объемов производства и снижения удельных затрат. По оценкам специалистов, около половины стоимости топливного элемента в настоящее время приходится на биполярные пластины, мембраны, катализатор и газодиффузионные слои. Суммарная стоимость этих компонентов может быть снижена на 65% за счет увеличения объемов производства с 1000 до 100000 единиц в год. Таким образом, увеличение производственных мощностей в 100 раз должно привести к снижению стоимости топливного элемента до \$50 за 1 кВт. Дальнейшее увеличение масштаба производства до 500000 единиц в год, по оценкам [13], позволит снизить стоимость еще на 10%, что позволяет достичь цены \$45 за 1 кВт.

Однако эти оценки сокращения затрат, скорее всего, являются завышенными так как не учитывают необходимость одновременного решения проблемы улучшения эксплуатационных характеристик и долговечности топливных элементов. Рост требований к долговечности может привести к повышению стоимости топливных элементов и ограничить снижение уровня затрат, ожидаемого за счет действия эффекта масштаба. Последние прогнозы Министерства энергетики США учитывают данные противоположные тенденции в динамике стоимости топливного элемента и оценивают ее в \$75 за 1 кВт [14].

Эффект масштаба в производстве может быть достигнут достаточно быстро за счет развития грузового транспорта на топливных элементах. Согласно доступной статистике, в 2017 г. в мире было продано около 1,6 млн автомобилей средней грузоподъемности и 1,8 млн автомобилей большой грузоподъемности [6]. Грузовик требует примерно вдвое больше мощности, чем легковой автомобиль, а большегрузный грузовик требует примерно в четыре раза больше мощности, что может быть достигнуто путем установки топливных элементов рядом с друг с другом. Если считать, что для оснащения легкого грузовика требуется 2 топливных элемента, а для оснащения тяжелого — 4, то при доле водородных грузовых автомобилей хотя бы 5% в новых продажах, потребуются пять площадок по производству топливных элементов мощностью 100000 единиц в год. Если рассмотреть планы Китая, что для того, чтобы оснастить, хотя бы четверть грузовиков,

продаваемых в стране, топливными элементами, потребуется строительство 10 заводов, производящих 100000 топливных элементов в год.

Размер рынка пассажирских транспортных средств намного больше, чем рынка грузовых автомобилей: по данным 2017 г. продажами новых автомобилей составили около 85 млн пассажирских автомобилей и 10 млн продаж легких коммерческих грузовиков. Если учесть, что для автомобилей такого класса требуется система, состоящая из одной батареи топливных элементов с пиковой мощностью 80-100 кВт, то при достижении водородными автомобилями доли рынка в 5%, потребуется 40 производственных предприятий, каждое со средней производительностью 100000 топливных элементов в год.

Стоимость резервуара для хранения водорода на борту является на настоящий момент важной составляющей полной стоимости автомобиля на топливных элементах. Она, в основном, определяется дорогими композитными материалами. Согласно экспертным оценкам, стоимость композитных материалов будет снижаться не столь быстрыми темпами как, например, стоимость топливных ячеек. Для хранения водорода на борту легковых и грузовых автомобилей необходимо предварительное сжатие газа до давления 350-700 бар, на что расходуется примерно 6-15% всей энергии, содержащейся в водороде. Стоимость используемых сегодня бортовых систем хранения (включая клапаны и регуляторы) оцениваются в \$23/кВт·ч при масштабах производства 10000 единиц в год. При увеличении масштабов производства до 500000 единиц в год можно ожидать снижение стоимости резервуара до \$14-18/кВт·ч [15, 16]. По оценкам Министерства энергетики США для достижения стоимостной конкурентоспособности водородного автомобиля, стоимость резервуара для хранения должна снизиться до \$8 за 1 кВт·ч [14]. При такой стоимости резервуар автомобиля с запасом хода 600 км и мощностью 225 кВт·ч в перспективе будет стоить \$1800, тогда как сегодняшняя его стоимость оставляет \$3400. Для большегрузного грузовика с запасом хода 700 км и мощностью 1800 кВт·ч текущая стоимость резервуара оценивается \$27700, а ее потенциальное снижение возможно до \$16700. Для сравнения полная стоимость обычного дизельного грузовика сегодня составляет от \$100000 до 150000.

Оценка потенциала снижения стоимости инфраструктуры для зарядки водородных автомобилей в настоящее время затруднена в виду отсутствия открытых статистических данных. Сегодня в мире действует не более 400 заправочных водородных станций, и смета их расходов является коммерческой тайной. Единственными доступными данными являются данные об инвестициях в строительство водородных заправочных станций, которые оцениваются в диапазоне от \$0,6 до 2 млн за станцию с давлением 700 бар и \$0,15-1,6 млн за станцию с давлением 350 бар [6]. Мощность заправочных станций при этом колеблется от 50 кг H_2 до 1300 кг H_2 в сутки.

Двумя основными компонентами стоимости заправки являются компрессор (его доля в общей стоимости может достигать 60% при заправке водо-

родом под давлением 700 бар) и резервуар для хранения, размеры которого достаточно велики, учитывая низкую плотность водорода. Фактическая стоимость строительства может существенно различаться по странам, в основном, из-за разных требований к безопасности.

Увеличение мощности станции от 50 до 500 кг H_2 в день, согласно оценкам МЭА, может снизить удельную стоимость заправки (в пересчете на кг поставляемого водорода) на 75%. В настоящее время запланировано строительство зарядных станций еще с большей производительностью до 1000 кг H_2 /сутки для обслуживания грузового транспорта на водороде, поэтому перспективы получения эффекта масштаба за счет увеличения мощности и станций есть. Существует также возможность снижения затрат за счет перехода на более гибкие способы заправки (например, при очень высоком давлении или заправка жидким водородом). При осуществлении этих возможностей масштабирование будет достигнуто путем массового производства таких компонентов, как компрессоры.

Противоположные тенденции снижения стоимости самой заправочной станции, конечной стоимости водорода для потребителя и спроса на водород, делают процесс развития заправочной инфраструктуры рискованным. При низком спросе на водород экономически оправданным решением является строительство заправочных станций небольшой мощности, поскольку они с большей вероятностью обеспечат более высокую загрузку мощностей. Однако при перерасчете стоимости строительства и содержания такой станции на единицу отпускаемой продукции получается, что вклад стоимости заправки в общую конечную цену водорода для потребителя слишком велик. При достижении достаточных объемов спроса более крупные станции становятся более экономичными и могут способствовать снижению стоимости водорода для конечных пользователей. Стоимость водорода на заправке также будет зависеть от того, где он производится - непосредственно на месте (или вблизи) заправки или поставляется с централизованных производственных мощностей. Ценовые преимущества централизованного производства водорода могут быть легко нивелированы затратами на его доставку до заправочной станции с помощью специализированных грузовиков или трубопровода. Самый дешевый вариант будет определяться индивидуально для каждой заправки.

Несмотря на более высокие начальные затраты по сравнению с зарядной инфраструктурой для электромобилей, водородные заправочные станции могут демонстрировать значительные преимущества при масштабном развертывании. В первую очередь, это скорость дозаправки, требования по площади (примерно в 15 раз ниже), а также потенциально более низкие конечные инвестиционные затраты на всю сеть (FCH2, 2019). При полном развертывании сети заправочных станций для обслуживания 1 млн водородных автомобилей потребуется около 400 заправочных станций [17, 18], тогда как для обслуживания такого же парка электромобилей требуется около миллиона частных зарядных станций и не менее 10000 общественных станций быстрой зарядки.

Чтобы удовлетворить потребности растущего парка водородных автомобилей, необходимо будет обеспечить своевременные потоки инвестиций в заправочную инфраструктуру. Так как большинство заправочных станций, обслуживающих частные автомобили на водородном топливе (не государственный и не корпоративный парк), на ранних стадиях развития инфраструктуры, скорее всего будут иметь мощность не более 200 кг H_2 в день, то общие инвестиции, необходимые для строительства 400 станций могут составить порядка \$0,5-0,6 млрд. При увеличении количества водородных автомобилей до 60 млн (что составляет 5% от всего мирового парка автомобилей) и строительстве более мощных заправочных станций (более 1000 кг/сут), потребуются инвестиции в размере \$35-45 млрд [6]. Для того, чтобы привлечь такие значительные объемы инвестиций необходимы действенные меры поддержки со стороны властей. На начальных этапах развития такими мерами могут быть разработка совместных дорожных карт развития промышленных предприятий, а также стимулирование владельцев автозаправочных станций для корпоративных автопарков к открытию их для общественного пользования. Такие меры позволят обычным пользователям иметь доступ к большему количеству заправочных станций.

Перечень наиболее популярных мер государственной поддержки развития водородного автотранспорта включает стандарты экономии топлива, стимулирующие льготы и бонусы для владельцев автомобилей с нулевыми выбросами и обязательные платежи для владельцев традиционных автомобилей на углеводородном топливе, которые, по сути, облагают налогом наихудшие транспортные средства для субсидирования тех, которые работают лучше всего с точки зрения минимизации выбросов CO_2 или других загрязняющих веществ. Кроме того, как стимулирующие меры могут использоваться субсидии на покупку [2, 19]. Топливные стандарты и сборы могут быть нейтральными с точки зрения технологии, в то время как требование нулевых выбросов является более направленным на развитие водородных и электромобилей и может помочь обеспечить спрос на водородное топливо, столь необходимый для снижения стоимости водорода на заправочных станциях.

Первоначальный акцент на создание инфраструктуры заправки для базовых автопарков (государственных, корпоративных, муниципальных) позволяет преодолеть барьер недоиспользования. Автозаправочные станции, первоначально построенные для автотранспорта на промышленных площадках, в кластерах и в портах, автобусов, такси, могут быть открыты для общественного пользования, тем самым предлагая точки заправки для первых пользователей водородных автомобилей по низкой предельной стоимости. Альтернативный подход предполагает субсидирование ставки по кредитам на строительство заправочных станций, исходя из разницы между фактическим и планируемым коэффициентами использования. Такой подход применяется сейчас в Калифорнии [6].

Государство также может оказывать существенную поддержку на начальных этапах развития зарядной

инфраструктуры за счет снижения нормативных требований, связанных с транспортировкой водорода (например, через мосты и туннели), при выдаче разрешений на строительство инфраструктурных объектов, посредством обеспечения взаимодействия заинтересованных сторон для привлечения необходимых инвестиций, посредством гарантий обязательств отраслевых партнеров при предоставлении надежных и хорошо структурированных бизнес-планов, а также посредством временного перераспределения средств, поступающих в виде налогов на транспортные средства или топливо, для снижения инвестиционного риска зарождающейся сети водородных заправочных станций.

Стоимость владения

Удельное потребление топлива (на километр пробега) у больших автомобилей выше, что означает, что расходы на топливо в общей стоимости владения у таких автомобилей составляют значительную долю. Это справедливо и для транспортных средств с высокой загрузкой (таких как грузовики дальнего следования, междугородные автобусы, коммерческие автопарки). Стоимость покупки грузового автомобиля составляет от 40 до 70% в общей стоимости владения (для сравнения, у легкового автомобиля стоимость покупки колеблется от 70 до 95%). Поэтому для развития грузового транспорта на водороде снижение стоимости топлива на месте заправки не менее важно, чем снижение стоимости его покупки за счет удешевления основных компонент.

Следует признать, что стоимость владения не является единственным критерием при принятии решения о покупке автомобиля. Определенным категориям покупателей может быть важен ассортимент моделей. Проиллюстрируем это на примере. Среднестатистический современный электромобиль имеет запас хода около 250 км, что вполне достаточно для большинства ежедневных поездок. Водородные автомобили предлагают больший запас хода: Toyota Mirai предлагает около 400 км, а Hyundai Nexo — даже больше. При условии, что водородные заправочные

станции расположены вдоль желаемых маршрутов, водородный автомобиль может выезжать по маршруту Москва – Санкт-Петербург (около 750 км) с одной короткой дозаправкой. Та же поездка на электромобиле с дальностью хода 250 км потребует остановки для зарядки как минимум дважды. Разные потребители по-разному оценят данные возможности, согласно их индивидуальным приоритетам и предпочтениям.

Стоимость владения водородным автомобилем и электромобилем в будущем могут сравниться при дальности поездки до 400 км. Снижение затрат на топливные элементы и резервуары для хранения водорода, а также обеспечение высокой загрузки заправочной инфраструктуры являются ключом к достижению конкурентоспособности. При снижении стоимости топливных элементов за счет экономии на масштабе до \$50 за кВт, водородные автомобили сравнятся по стоимости владения с электромобилями на дальности пробега около 400 км (табл. 1). Если стоимость топливных элементов удастся снизить только до \$75 за 1 кВт (например, за счет разнонаправленного действия эффекта масштаба и повышения требований по долговечности), то водородные автомобили сравнятся по стоимости владения с электромобилями на дальности пробега около 500 км. Это подчеркивает тот факт, что водородные электромобили являются экономически привлекательными для потребителей, осуществляющих дальние поездки. Увеличение мощности заправочной станции коэффициента ее загруженности может снизить конечную цену водорода для потребителя на \$4-13/кг.

Таким образом, электромобили и водородные автомобили могут дополнять друг друга в качестве альтернативных вариантов, удовлетворяющие различных потребителей. Водородные автомобили предлагают лучшие возможности для мобильности на большие расстояния, с требованиями быстрой дозаправки и в регионах с доступным дешевым водородом.

Высокий риск неиспользования заправочных станций подчеркивает важность обеспечения их загруженности для снижения затрат на начальных этапах развертывания водородного транспорта, даже для тех

Таблица 1

Реальная и прогнозная покомпонентная стоимость владения различными типами автомобилей с низкоуглеродной эмиссией (\$/км)

Тип транспортного средства		Автомобиль на топливных элементах, пробег 400 км	Электромобиль, пробег 400 км	Электромобиль, пробег 250 км	Гибридный автомобиль с двигателем внутреннего сгорания
Компоненты стоимости					
Автомобиль		0,3	0,3	0,3	0,3
Батарея/топливный элемент	Реальная	0,21	0,19	0,12	–
	Прогнозная	0,05	0,09	–	–
Содержание и эксплуатация	Реальная	0,07	0,05	0,05	0,36
	Прогнозная	0,07	0,05	–	0,37
Топливо (электричество)	Реальная	0,035	0,015	0,015	0,08
	Прогнозная	0,02	0,015	–	0,04
Синтетическое топливо (низкоуглеродное)	Реальная	–	–	–	0,11
	Прогнозная	–	–	–	0,12
Зарядная инфраструктура	Реальная	0,04	0,015	0,015	–
	Прогнозная	0,02	0,01	0,01	–
Полная стоимость	Реальная	0,655	0,57	0,485	0,55
	Прогнозная	0,46	0,465	–	0,53

Составлено по данным [6]

видов автомобилей, для которых доля топлива в общей стоимости является минимальной. Стоит отметить, что в Калифорнии потребовалось около двух лет, чтобы увеличить средний коэффициент использования заправочной сети водородных автомобилей с 5 до 40%, хотя некоторые станции все еще работают с загрузкой ниже 10%. В настоящее время средняя мощность заправочной станции сейчас составляет около 200 кг·Н₂/сут [20].

Сегмент магистральных перевозок большой грузоподъемности, включая грузовики и междугородные автобусы (или туристические автобусы), предлагает большие перспективы для водородных транспортных средств, потому что они требуют большой дальности и мощности. Прямая электрификация региональных автобусов и автомобилей большой грузоподъемности, осуществляющих пассажирские и грузовые перевозки на дальние расстояния существенно затруднена из-за большей емкости аккумулятора, длительного времени зарядки и высоких требований к мощности, что приводит к потере полезной нагрузки и дополнительным расходам на развитие инфраструктуры подзарядки. Электрические грузовики на топливных элементах преодолевают некоторые из этих проблем.

В случае большегрузных автомобилей дальнего следования затраты на топливные элементы выше, чем у легких грузовиков, в основном в результате высоких требований к долговечности. В настоящее время эти требования обеспечиваются за счет увеличенной нагрузки катализатора, что приводит к увеличению затрат. Потенциал снижения затрат на системы топливных элементов для тяжелых грузовиков оценивается в \$95/кВт (при объеме производства 100000 единиц в год) [14]. Даже при нынешних ценах на топливные элементы водородные тяжелые грузовики могут быть конкурентоспособными по сравнению с электрическими грузовиками на расстояниях более 600 км, при условии обеспечения конечной цены водорода не более \$7/кг (табл. 2).

Если рассматривать грузовики на топливных элементах в сравнении с другими безуглеродными

опциями, то, как помимо электрогрузовиков и дизельных грузовиков на синтетическом топливе, в рассмотрение можно включить еще и грузовики с динамической зарядкой. Динамическая зарядка (или другое распространенное название — электрическая дорога, e-road) в настоящее время является наиболее дешевой и потому коммерчески привлекательной альтернативой электрическим и водородным грузовым автомобилям. Рассмотренные опции могут также сосуществовать друг с другом и дополнять друг друга в зависимости от планируемой дальности и маршрута поездки.

Снижение стоимости топливных элементов до \$95 за 1 кВт может сделать грузовики на водороде конкурентоспособными по полной стоимости владения с дизельными гибридными грузовиками при цене на водород около \$7 за 1 кг Н₂. Сейчас конкурентоспособность с грузовыми автомобилями с двигателем внутреннего сгорания может быть достигнута только при цене за водород около \$5 за 1 кг [6]. Для того, чтобы грузовики на топливных элементах были конкурентоспособными с электрическими дорожными системами или аккумуляторными электрическими грузовиками на расстоянии менее 500 км, цена на водород должна быть менее \$5 за 1 кг Н₂. Из-за ограниченного размера рынка грузовых автомобилей, достижение целевой стоимости топливных элементов может оказаться невозможным за счет наращивания их использования только в грузовиках автомобилях и, скорее всего, будет существенным образом зависеть от развития пассажирских автомобилей на топливных элементах.

Развитие производства погрузчиков на топливных элементах и других видов небольшого мобильного коммерческого транспорта, также может помочь достижению эффекта масштаба и снижению удельных затрат на производство топливного элемента. Однако мощность такого оборудования обычно в три раза меньше, чем мощность пассажирского автомобиля, поэтому для снижения удельных затрат ниже \$80 за 1 кВт, потребуются объемы производства около 3000 единиц погрузочных машин в год.

Таблица 2

Реальная и прогнозная покомпонентная стоимость владения различными типами грузовых автомобилей с низкоуглеродной эмиссией (\$/км)

Тип транспортного средства		Грузовой автомобиль на топливных элементах	Грузовой электромобиль	Гибридный грузовой автомобиль с двигателем внутреннего сгорания	Электрическая дорога (e-road)
Грузовой автомобиль		0,2	0,2	0,2	0,2
Батарея/топливный элемент	Реальная	0,18	0,32	0,06	–
	Прогнозная	0,08	0,16	0,08	0,12
Содержание и эксплуатация	Реальная	0,1	0,09	0,19	–
	Прогнозная	0,1	0,09	0,19	0,12
Топливо (электричество)	Реальная	0,44	0,26	0,35	–
	Прогнозная	0,22	0,13	0,33	0,16
Синтетическое топливо (низкоуглеродное)	Реальная	–	–	0,45	–
	Прогнозная	–	–	0,75	0,03
Зарядная инфраструктура	Реальная	0,13	0,08	–	–
	Прогнозная	0,08	0,08	–	0,06
Полная стоимость	Реальная	1,05	0,95	1,25	–
	Прогнозная	0,68	0,66	1,55	0,69

Составлено по данным [6]

В случае грузовых автомобилей и автобусов стоимость зарядочной инфраструктуры может быть снижена за счет использования модели «ступица и спица» [20]: когда парк транспортных средств, работающий на фиксированных маршрутах, может обслуживаться на единой централизованной водородной заправке. Примером привлекательной стартовой площадки для развития водородного транспорта может быть крупный порт. Так как вблизи порта чаще всего располагаются промышленные кластеры, перевод портового погрузочно-разгрузочного оборудования и коммерческого транспорта на предприятиях кластера на водородное топливо может быть коммерчески целесообразным за счет полной загрузки мощности заправочных станций. Эффективность таких моделей была подтверждена опытом быстрого внедрения автобусов и грузовиков на водородных топливных элементах в Китае, где удалось за счет производства водорода вблизи мест его использования и полной загрузки заправочных станций добиться конкурентоспособности водородного транспорта.

Водородные технологии на морских судах и в портах

Морской транспорт сегодня является самым дешевым способом перевоза грузов на большие расстояния. Около 90% объема товаров в мире доставляется морским путем, из которых одна треть — это энергоносители, в частности нефтепродукты [21]. Около 80% топлива в морском секторе приходится на международные перевозки, из которых 90% грузовые. В результате международное судоходство является важным фактором изменения климата: на него приходится около 2,5% мировых выбросов CO₂, связанных с потреблением энергетических ресурсов.

Морской транспорт использует в качестве топлива тяжелые нефтепродукты, что оказывает большое пагубное воздействие на качество воздуха, особенно в районе портов.

По оценкам экспертов объемы морских перевозок к 2050 г. вырастут более чем в три раза по сравнению с текущими значениями. В отсутствие политики смягчения последствий изменения климата это может привести к увеличению спроса на нефтепродукты в отрасли на 50% — до значений примерно 6 млн баррелей в сутки.

Переход на водородное топливо является одним из вариантов решения экологических проблем морского судоходства. Международная морская организация (ИМО) разработала стратегии по сокращению выбросов серы и парниковых газов. В некоторых странах (например, Норвегия и Швеция) также установлены цели по освоению низкоуглеродных альтернатив во внутреннем судоходстве. Европейская комиссия в настоящее время разрабатывает стратегии сокращению выбросов CO₂ для морского транспорта путем анализа и мониторинга выбросов CO₂ с больших судов. Рассматриваются возможности включения морского судоходства в европейскую систему торговли выбросами с 2023 г.

Крупнейшая в мире морская компания Maersk объявила в 2018 г., что стремится стать углеродно-

нейтральной к 2050 г. Для этого технологические решения по переводу морских судов на низкоуглеродные опции к 2030 г. должны стать коммерчески жизнеспособными [6]. Лидеры отрасли также составили план действий по декарбонизации сектора судоходства, который включает реализацию демонстрационных проектов, внедрение технологий, прозрачность и обмен знаниями [6].

К возможным техническим решениям по сокращению выбросов серы относятся установка скрубберов, переход на сжиженный природный газ (СПГ) и использование мазута с очень низким содержанием серы. Однако эти меры могут внести лишь частичный вклад в сокращение выбросов парниковых газов на 50% к 2050 г. по сравнению с 1990 г. Ограничения на выбросы серы, скорее всего, в первую очередь будут стимулировать спрос на водород на нефтеперерабатывающих заводах, а не в качестве топлива для судоходства. Для достижения целей по сокращению выбросов парниковых газов в качестве альтернативных вариантов топлива можно рассматривать усовершенствованное биотопливо, водород, аммиак, а также синтетическое жидкое топливо на водородной основе. Конкурентоспособность данных альтернатив будет определяться наличием заправочной инфраструктуры. Использование СПГ, водорода и аммиака в качестве топлива потребует строительства бункеровочных мощностей, однако следует учесть, что использование СПГ и аммиака возможно уже в рамках существующей инфраструктуры. Доступность и стоимость передовых видов биотоплива неопределенны, в силу наличия конкуренция со стороны других секторов за ограниченное предложение биомассы.

В настоящее время в мире известно не так много успешных проектов перевода морского транспорта на водородное топливо. Среди них можно отметить один проект, реализуемый в Бельгии по использованию смеси из водорода и дизельного топлива в двигателях внутреннего сгорания, и более 20 проектов использования топливных элементов мощностью до 300 кВт, в основном для вспомогательных энергоблоков. Проекты по использованию топливных элементов совместно с аккумуляторами реализуются в Калифорнии, Ирландии и Норвегии [6]. Также можно отметить несколько исследовательских и демонстрационных проектов, которые анализируют параметры сжигания аммиака в качестве топлива для судов [22]

Суда имеют высокое удельное потребление энергии на километр пути и, соответственно, большую потребляемую мощность (до 130 МВт для особо крупных контейнеровозов). Поэтому требования к топливу у сектора судоходства достаточно велики. Основные компоненты стоимости морских перевозок аналогичны автомобильным: это заправочная инфраструктура (бункеровочные объекты), бортовое оборудование (топливный элемент/двигатель и хранилище) и топливо.

Информация о стоимости использования жидкого водорода как топлива для морских перевозок разнится от источника к источнику. Например, в [23] авторы, оценивая дополнительные затраты на бункеровочные

объекты, предполагают, что инфраструктура хранения жидкого водорода может быть на 30% дороже, чем для СПГ. Однако эта оценка не включает первоначальные затраты, связанные с разработкой с нуля новой инфраструктуры для хранения водорода, которой в настоящее время просто не существует [24]. Основными составляющими затрат являются содержание судов-бункеровщиков, которые необходимо масштабировать параллельно с количеством обслуживаемых судов. Для небольших портов более целесообразным вариантом представляется размещение мощностей по производству водорода прямо в порту или поблизости, так как стоимость выделенных трубопроводов для транспортировки водорода на большие расстояния велика. В то же время, вклад самого судна и инфраструктуры в общую стоимость эксплуатации судна, учитывая его 15-летний срок службы, относительно невелик по сравнению с затратами на топливо.

Среди всех возможных видов водородного топлива только аммиак уже продается во всем мире, кроме того существует инфраструктура, которая потребуется для использования его в качестве топлива. Однако при его полномасштабном использовании необходимо будет не только многократное увеличение производственных мощностей, но и развитие инфраструктуры — строительство новых бункеровочных объектов, портовых и распределительных сооружений, резервуары для хранения. По оценкам МЭА для обеспечения растущих объемов морских перевозок в долгосрочной перспективе потребуется 500 млн т аммиака, что почти в три раза превышает уровень текущего мирового производства, и примерно в тридцать раз объем торговли аммиаком в настоящее время.

В отсутствие каких-либо программ государственной поддержки переход на низкоуглеродное топливо маловероятен, так как компании-перевозчики, которые контролируют более половины операций контейнерного флота и нанимают суда у судовладельцев, имеют очень небольшой горизонт бизнес-планирования и заинтересованы в быстрокупаемых проектах. Для изменения их приоритетов потребуются меры государственного стимулирования, такие как налогообложение выбросов парниковых газов, низкоуглеродные стандарты топлива и т. д. [19].

Как показывает анализ, проведенный в [6], суда, обслуживающие дальние морские торговые пути, могут предложить наиболее экономически привлекательные потенциальные возможности использования водорода, аммиака и других видов топлива на водородной основе. Причиной является тот факт, что система топливных элементов и затраты на хранение водорода имеют меньший вес по сравнению с затратами на топливо.

Кроме того, требования к месту для размещения топливных элементов, которые по размеру превосходят обычный двигатель внутреннего сгорания примерно в два раза, могут быть проблемой для малых судов (менее 2 МВт). Для хранения жидкого водорода требуется объем, как минимум, в пять раз больше, чем для хранения обычного топлива из нефтепродуктов, а хранение аммиака требует в три раза большего объема [25]. В долгосрочной перспективе это может потребовать либо разработки новых проектировочных реше-

ний для судов, либо сокращения дальности маршрутов перевозок, организации более частых дозаправок, снижение грузоподъемности судов или сочетания вышеперечисленных решений в зависимости от типа груза и маршрута судна [25].

Стоимость низкоуглеродного топлива на настоящий момент гораздо выше, чем стоимость мазута и СПГ. Как уже отмечалось выше, цены на топливо являются ключом к экономической конкурентоспособности, так как доля затрат на инфраструктуру в общей стоимости содержания и эксплуатации судна намного ниже, чем для других видов транспорта. При цене на водород \$10/кг H_2 эта доля оценивается в 3% [6]. При снижении цены на водород до \$2 за 1 кг H_2 , доля инфраструктуры может вырасти до 17%. В случае, если бункеровочные мощности будут использоваться с неполной загрузкой доля инфраструктуры в общей стоимости эксплуатации судна может возрасти до 40%). Как и в случае автомобильного транспорта, риски недоиспользования бункеровочных мощностей можно снизить за счет использования резервуаров меньшего размера (которые можно расширять по мере увеличения емкости) или использование менее мощных заправочных станций. Однако для снижения конечной цены на топливо более предпочтительным вариантом является использование мощных заправочных станций.

В предположении о 15-летнем сроке эксплуатации судна, для обеспечения конкурентоспособности аммиака по сравнению с ископаемым топливом потребуется налогообложение выбросов CO_2 в размере \$40-230 за 1 т [6]. Разброс оценки связан с неопределенностью стоимости доставки аммиака до потребителя, которая существенно варьируется в зависимости от региона. Для обеспечения безубыточности водорода ставка налога на выбросы должна быть выше примерно на \$35-45 (за 1 т CO_2), в основном из-за более высокой стоимости хранения водорода, обусловленной низкой энергетической плотностью. Такие существенные изменения в ценообразовании могут стать тяжелым бременем для судовладельцев, что, однако не должно существенным образом сказаться на стоимости перевозимых товаров, так как доля транспортных в них, как правило, невелика (часто менее 1%) [25]

Железнодорожный транспорт

К настоящему моменту данный вид транспорта уже является самым электрифицированным. Доля электрифицированных путей в большинстве стран мира продолжает расти, включая технологически развитые страны. Например, в странах Евросоюза наибольшая доля электрифицированных линий у Люксембурга (95,27%), Бельгии (86%), Нидерландов (75,67%), Швеции (75,21%) и Австрии (71,93%). Наименьшей доле электрифицированных железных дорог располагают Ирландия (2,75%), Литва (6,38%), Латвия (13,49%), Эстония (14,38%) и Греция (23,21%). Для не электрифицированных железных дорог в настоящее время разработано несколько инновационных технологий, таких как, поезда на аккумуляторных батареях и поезда на топливных элементах.

Водородные поезда уже существуют в ряде стран, а планы по развитию данной технологии разрабатывают еще большее количество стран. Два водородных поезда, которые могут проехать почти 800 км в день на одной заправке уже курсируют в Нижней Саксонии в Германии [26]. К 2021 г. Германия намерена расширить свой парк водородных поездов до 14, а пять из немецких федеральных земель подписали соглашение о намерениях закупить 60 поездов у компании Alstom. Австрийская компания Zillertalbahnhof планирует к 2022 г. запустить пять водородных поездов; объем инвестиций в их создание составил \$175 млн. Правительство Великобритании поддерживает запуск первых водородных поездов к 2022 г. [27]. Французское правительство планирует запустить первый водородный поезд к 2022 г. Японская национальная компания Japan Rail East также имеет проект по запуску водородного поезда, который реализуется в партнерстве с Toyota [6].

Уже сейчас водородные поезда рассматриваются как вполне конкурентоспособная альтернатива электрификации железной дороги на тех направлениях, где частота движения поездов низкая, а расстояния по маршруту большие.

Выводы

Проведенный анализ глобальных тенденций развития водородной энергетики в автомобильном и железнодорожном секторах, а также в секторе морских перевозок показывает, что при текущем уровне технологического развития наиболее перспективным с экономической точки зрения является внедрение водородных технологий в железнодорожном секторе. Большинство стран, включая развитые европейские державы, имеют существенный потенциал для дальнейшей электрификации железнодорожной сети, однако не реализуют его в силу низкой загруженности части маршрутов.

В секторе автомобильного транспорта достижение водородными технологиями точки ценового паритета с другими безуглеродными опциями (например,

с аккумуляторными электромобилями) возможно только при запуске эффекта масштаба производства и эффекта обучения в производстве, действие которых в перспективе позволит снизить стоимость топливных элементов и промышленного водорода. Запуск данных эффектов возможен только при целенаправленной поддержке развития водородного автомобильного транспорта, в первую очередь, на внутренних рынках стран – разработчиков водородного автотранспорта. Одной из наиболее эффективных форм поддержки внутреннего рынка являются государственные закупки водородного автотранспорта для муниципальных или корпоративных нужд. Создание крупных парков водородных автомобилей, функционирующих на определенных сравнительно небольших территориях (например, в пределах городской черты или в пределах производственного кластера) позволяют снизить риски недоиспользования дорогостоящей заправочной инфраструктуры и, как следствие, снизить полную стоимость владения водородным автомобилем.

Сектор морских перевозок пока что наименее затронут развитием водородных транспортных технологий и не предоставляет достаточно данных для оценки перспектив запуска эффектов масштаба производства и обучения, позволяющих снизить стоимость судов на топливных элементах. По аналогии с развитием автомобильного транспорта на водороде можно предположить, что наиболее эффективной стратегией поддержки данного сектора будет перевод на водород судов, осуществляющих перевозки в границах крупных портовых кластеров. Причем данный перевод необходимо осуществлять синхронно с переводом на водород портового автотранспорта и погрузочно-разгрузочного оборудования.

* * *

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-010-00589 «Разработка методологии и инструментария оценки эффективности вариантов государственной поддержки инновационных транспортных технологий в контексте новой климатической политики России».

Список использованных источников

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 1523-р от 9.06.2020 г. <http://static.government.ru/media/files/w4sigF0iDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf>.
2. С. В. Ратнер, С. С. Маслова. Государственное стимулирование развития рынка электрических транспортных средств: мировой опыт // Финансы и кредит. 2017. Т. 23. Вып. 22. С. 1281-1299.
3. К. Р. Макконнелл, С. Л. Брю. Экономикс: принципы, проблемы и политика. Т. 2. М.: Республика, 1992. 400 с.
4. Arrow Kenneth J. The economic implications of learning by doing // Review of Economic Studies, 1962, 29 (3): 155-173.
5. Bahk Byong K., Michael Gort. Decomposing learning by doing in new plants // Journal of Political Economy, 1993, 101 (4): 561-583.
6. The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. IEA, 2019. P. 203.
7. Global EV Outlook 2018. Toward cross-modal electrification. OECD/IEA, 2018. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2018>.
8. Global EV Outlook 2019. Scaling-up the transition to electric mobility. IEA, 2019. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>.
9. А. Е. Козлов, В. В. Иосифов. Современное состояние и перспективы развития инновационных транспортных систем на водородном топливе // В сб.: «Управление инновациями-2019». Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 167-173.
10. ACTU, 2019. Hyundai prévoit finalement 1600 camions hydrogènes pour la Suisse et l'Europe [Hyundai finally expects 1 600 hydrogen trucks for Switzerland and Europe]. <https://www.actu-transportlogistique.fr/routier/hyundai-prevoit-finalement-1-600-camions-hydrogenes-pour-la-suisse-etleurope-517674.php>.
11. H. Yumiya, M. Kizaki, H. Asai. Toyota Fuel Cell System (TFCS) // World Electric Vehicle Journal. 2015. Vol. 7. P. WEVJ7-0085.
12. D. Papageorgopoulos. Fuel Cells Sub-Program Overview, United States Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress17/v_0_papageorgopoulos_2017.pdf.
13. A. Wilson, G. Kleen, D. Papageorgopoulos. Fuel Cell System Cost – 2017, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. 2017. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/17007_fuel_cell_system_cost_2017.pdf.
14. US DOE (United States Department of Energy) (2019). «Fuel Cell R&D Overview», 2019. Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Washington, DC. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review19/plenary_fuel_cell_papageorgopoulos_2019.pdf.
15. R. Vijayagopal, N. Kim, A. Rousseau. Fuel Cell Powered Vehicles: An Analysis of How Technology Progress Affects the Technical and Economic Feasibility. Argonne Report ANL-17/07, May 2017.
16. N. Kim, A. Moawad, R. Vijayagopal, A. Rousseau. Impact of Fuel Cell and Storage System Improvement on Fuel Consumption and Cost // World Electric Vehicle Journal. 2016. № 8. P. 305-314.

17. M. Robinius, A. Otto, P. Heuser et al. Linking the Power and Transport Sectors — Part 1: The Principle of Sector Coupling//Energies. 2017. № 10. P. 956.
18. Y. Ligen, H. Vruble, H. H. Girault. Mobility from Renewable Electricity: Infrastructure Comparison for Battery and Hydrogen Fuel Cell Vehicles//World Electric Vehicle Journal. 2018. № 9. P. 3.
19. С. В. Ратнер. Эволюция транспортной инфраструктуры в целях охраны климата: развитие инновационных технологий автомобильного транспорта в России и мире//Инновации. 2019. № 5. С. 28-34.
20. K. Reddi, A. Elgowainy, N. Rustagi, E. Gupta. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen//Int. J. Hydrogen Energy. 2017. № 42. P. 21855-21865.
21. IMO (International Maritime Organization) (2014). Third IMO GHG Study 2014, IMO, London. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>.
22. T. Brown. Pilot project: an ammonia tanker fueled by its own cargo. Ammonia Energy, 2018. <https://www.ammoniaenergy.org/pilot-project-an-ammonia-tanker-fueled-by-its-own-cargo>.
23. M. Lehtveer, S. Brynolf, M. Grahn. What Future for Electro fuels in Transport? Analysis of Cost Competitiveness in Global Climate Mitigation//Environmental Science & Technology. 2019. № 53 (3). P. 1690-1697.
24. D. Hagos, E. Ahlgren. Exploring cost-effective transitions to fossil independent transportation in the future energy system of Denmark//Applied Energy. 2020. № 261. P. 114389.
25. E. Bouman, E. Lindstad, A. Rialland, A. Strømman. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review//Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2017. № 52. P.408-421.
26. World premiere: Alstom's hydrogen trains enter passenger service in Lower Saxony. <https://www.alstom.com/press-releases-news/2018/9/world-premiere-alstoms-hydrogen-trainsenter-passenger-service-lower>.
27. E. Wiseman. Hydrogen fuel cell trains to run on British railways from 2022. The Telegraph, 2019. <https://www.telegraph.co.uk/cars/news/hydrogen-fuel-cell-trains-run-british-railways-2022>.

References

1. Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation № 1523-r dated 9.06.2020. <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf>.
2. S. V. Ratner, S. S. Maslova. State stimulation of the development of the electric vehicle market: world experience//Finance and Credit. 2017. Vol. 23. Issue 22. P. 1281-1299. (In Russian.)
3. C. R. McConnell, S. L. Bru. Economics: principles, problems and politics. Vol. 2. Moscow: Respublika Publ., 1992. 400 p.
4. Arrow Kenneth J. The economic implications of learning by doing//Review of Economic Studies, 1962, 29 (3): 155-173.
5. Bahk Byong K., Michael Gort. Decomposing learning by doing in new plants//Journal of Political Economy, 1993, 101 (4): 561-583.
6. The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. IEA, 2019. P. 203.
7. Global EV Outlook 2018. Toward cross-modal electrification. OECD/IEA, 2018. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2018>.
8. Global EV Outlook 2019. Scaling-up the transition to electric mobility. IEA, 2019. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>.
9. A. E. Kozlov, V. V. Iosifov. Current state and development prospects of innovative transport systems on hydrogen fuel//In the collection: «Management of innovation-2019». Materials of the international scientific and practical conference. 2019. P. 167-173. (In Russian.)
10. ACTU, 2019. Hyundai prévoit finalement 1600 camions hydrogènes pour la Suisse et l'Europe [Hyundai finally expects 1 600 hydrogen trucks for Switzerland and Europe]. <https://www.actu-transportlogistique.fr/routier/hyundai-prevoit-finalement-1-600-camions-hydrogenes-pour-la-suisse-et-leurope-517674.php>.
11. H. Yumiya, M. Kizaki, H. Asai. Toyota Fuel Cell System (TFCS)//World Electric Vehicle Journal. 2015. Vol. 7. P. WEVJ7-0085.
12. D. Papageorgopoulos. Fuel Cells Sub-Program Overview, United States Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress17/v_0_papageorgopoulos_2017.pdf.
13. A. Wilson, G. Kleen, D. Papageorgopoulos. Fuel Cell System Cost – 2017, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. 2017. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/17007_fuel_cell_system_cost_2017.pdf.
14. US DOE (United States Department of Energy) (2019). «Fuel Cell R&D Overview», 2019. Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Washington, DC. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review19/plenary_fuel_cell_papageorgopoulos_2019.pdf.
15. R. Vijayagopal, N. Kim, A. Rousseau. Fuel Cell Powered Vehicles: An Analysis of How Technology Progress Affects the Technical and Economic Feasibility. Argonne Report ANL-17/07, May 2017.
16. N. Kim, A. Moawad, R. Vijayagopal, A. Rousseau. Impact of Fuel Cell and Storage System Improvement on Fuel Consumption and Cost//World Electric Vehicle Journal. 2016. № 8. P. 305-314.
17. M. Robinius, A. Otto, P. Heuser et al. Linking the Power and Transport Sectors —Part 1: The Principle of Sector Coupling//Energies. 2017. № 10. P. 956.
18. Y. Ligen, H. Vruble, H. H. Girault. Mobility from Renewable Electricity: Infrastructure Comparison for Battery and Hydrogen Fuel Cell Vehicles//World Electric Vehicle Journal. 2018. № 9. P. 3.
19. S. V. Ratner. Evolution of transport infrastructure for climate protection: development of innovative technologies for road transport in Russia and the world//Innovations. 2019. № 5. P. 28-34. (In Russian.)
20. K. Reddi, A. Elgowainy, N. Rustagi, E. Gupta. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen//Int. J. Hydrogen Energy. 2017. № 42. P. 21855-21865.
21. IMO (International Maritime Organization) (2014). Third IMO GHG Study 2014, IMO, London. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>.
22. T. Brown. Pilot project: an ammonia tanker fueled by its own cargo. Ammonia Energy, 2018. <https://www.ammoniaenergy.org/pilot-project-an-ammonia-tanker-fueled-by-its-own-cargo>.
23. M. Lehtveer, S. Brynolf, M. Grahn. What Future for Electro fuels in Transport? Analysis of Cost Competitiveness in Global Climate Mitigation//Environmental Science & Technology. 2019. № 53 (3). P. 1690-1697.
24. D. Hagos, E. Ahlgren. Exploring cost-effective transitions to fossil independent transportation in the future energy system of Denmark//Applied Energy. 2020. № 261. P. 114389.
25. E. Bouman, E. Lindstad, A. Rialland, A. Strømman. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review//Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2017. № 52. P.408-421.
26. World premiere: Alstom's hydrogen trains enter passenger service in Lower Saxony. <https://www.alstom.com/press-releases-news/2018/9/world-premiere-alstoms-hydrogen-trainsenter-passenger-service-lower>.
27. E. Wiseman. Hydrogen fuel cell trains to run on British railways from 2022. The Telegraph, 2019. <https://www.telegraph.co.uk/cars/news/hydrogen-fuel-cell-trains-run-british-railways-2022>.