

Повышение энергоэффективности и перспективы использования водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте

Б. М. ЛАПИДУС

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. В статье раскрыта значимость повышения энергоэффективности железнодорожного транспорта в сочетании с переходом на нетрадиционные источники энергии в рамках парадигмы устойчивого развития и декарбонизации мировой экономики, а также в соответствии с задачами, определенными в документе «Глобальное видение развития железнодорожного транспорта до 2050 года». Показано, что наиболее перспективно использование водородных топливных элементов, которое находится в центре внимания Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». Раскрыт потенциал российской науки, позволяющий выполнить соответствующие исследования и разработки. Сделано заключение, что в России существуют необходимые наработки для того, чтобы приступить к внедрению подвижного состава на водородных топливных элементах. Для решения данной задачи требуется единый заказчик и научный интегратор проекта.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; энергоэффективность; декарбонизация; устойчивость железнодорожного транспорта; водородная энергетика; топливные элементы; глобальное видение развития железнодорожного транспорта

Значение и перспективы роста энергоэффективности отрасли. Вопросы эффективности использования и качества энергоресурсов исключительно важны для достижения конкурентоспособности и представления обществу экологически нейтральной транспортной альтернативы в рамках развития железнодорожного транспорта. Годовое потребление российских железных дорог составляет около 23 млн т условного топлива (рис. 1). При этом 45 % энергетического баланса составляет потребление электроэнергии на тягу поездов (42,7 млрд кВт·ч), а расходы дизельного топлива на тягу составляют 30 % (2,4 млн т). Несмотря на то что вопросы энергоэффективности постоянно находятся в центре внимания в технологическом комплексе ОАО «РЖД» и достигнуто снижение удельного расхода топлива и электроэнергии [1], потенциал для оптимизации значителен. Доля топливно-энергетических затрат на тягу поездов в общих расходах ОАО «РЖД» в 2018 г. составила 14,8 % (245 млрд руб.), а с учетом стационарной энергетики – 17,5 % (более 290 млрд руб.) [2].

■ E-mail: lapidusbm@mail.ru (Б. М. Лapidус)

Вопросы современных энергетических технологий, позволяющих снизить затраты и загрязняющие природу выбросы, крайне важны [3, 4]. В этом смысле понятие энергоэффективности неразрывно связано с понятием устойчивости железнодорожного транспорта [5, 6]. Организация Объединенных Наций (ООН) определяет устойчивость в первую очередь как гармоничное содружество общества с природной средой [7].

Опираясь на эту парадигму, Международный союз железных дорог (МСЖД) в своих документах [8] определяет вполне конкретные цели по обеспечению устойчивого развития железнодорожного транспорта:

- сокращение конечного потребления энергии от эксплуатации поездов на 30 % к 2030 г.;
- сокращение средних выбросов CO₂ от эксплуатации поездов на 50 % к 2030 г.;
- непревышение общего уровня выбросов CO₂ в абсолютном выражении даже при прогнозируемом росте объема перевозок;
- стремление к безуглеродной эксплуатации поездов к 2050 г. и предоставление обществу климатически нейтральной транспортной альтернативы;
- сокращение выбросов NO_x и PM10 на 40 % в абсолютном выражении;
- стремление к нулевым выбросам для неэлектрических поездов к 2050 г.;
- социально и экономически приемлемые уровни шума к 2050 г.

Согласно этим целям конечное потребление энергии к 2030 г. должно быть снижено на 30 %, и это с учетом роста объема перевозок. Главной стратегической целью является формирование условий для безуглеродной эксплуатации поездов к 2050 г.

Экологические ориентиры подтверждены в документах Европейского союза (ЕС), ООН и МСЖД:

- сокращение выбросов парниковых газов;
- декарбонизация поставок электроэнергии;
- достижение более устойчивого баланса видов транспорта;

- повышение эффективности железных дорог;
- энергоэффективность;
- качество воздуха (выбросы PM и NO_x);
- снижение шума и вибраций.

Кардинальная задача заключается в полной декарбонизации поставок электроэнергии. Она не является исключительно отраслевой, но в значительной степени зависит от энергетического баланса стран. При определении экологических последствий деятельности железнодорожного транспорта в нашей стране на данный момент углеводородные характеристики источников поставок энергии не учитываются, хотя известно, что большая часть энергии даже в России, несмотря на существенную долю гидроэлектростанций (17 %) и атомных электростанций (19 %), вырабатывается на тепловых электростанциях с потреблением угля, нефти и соответствующими выбросами [9]. В МСЖД и ЕС рассчитывают конечное потребление железнодорожного транспорта с учетом экологических факторов выработки электроэнергии, поставляемой железным дорогам.

С позиции экологической оптимизации макроэкономической среды необходимо достижение более устойчивого смещения баланса видов транспорта в сторону железнодорожного. Ведь известно, что современный железнодорожный транспорт в 4 раза энергоэффективнее автомобильного, в 8 раз эффективнее авиационного с точки зрения объемов потребления энергии на аналогичные объемы перевозок [10].

В документе «Глобальное видение развития железнодорожного транспорта до 2050 года» [8] МСЖД рекомендует эффекты от роста энергоэффективности железных дорог направлять на дальнейшее развитие энергоэффективности и снижение отрицательных факторов экологического воздействия отрасли на природу.

Необходимо определить инструменты, которые позволят системно воздействовать на уменьшение количества потребляемого дизельного топлива и соответственно сокращение выбросов углекислого газа и других загрязняющих веществ в атмосферу.

Наряду с повышением энергоэффективности дизельной тяги необходимо активизировать поиск и внедрение решений, составляющих альтернативу углеродным источникам энергии на тягу с учетом особенностей их использования на железнодорожном транспорте [11, 12]. Альтернативные дизельным энергетические установки на тяговом подвижном составе должны быть наиболее адаптированы к этим изменениям силовых режимов, требуемых для поддержания скорости во время движения поездов в связи с изменяющимся профилем и планом пути.

Внедрение новых энергетических ресурсов для транспорта происходит в очень противоречивых

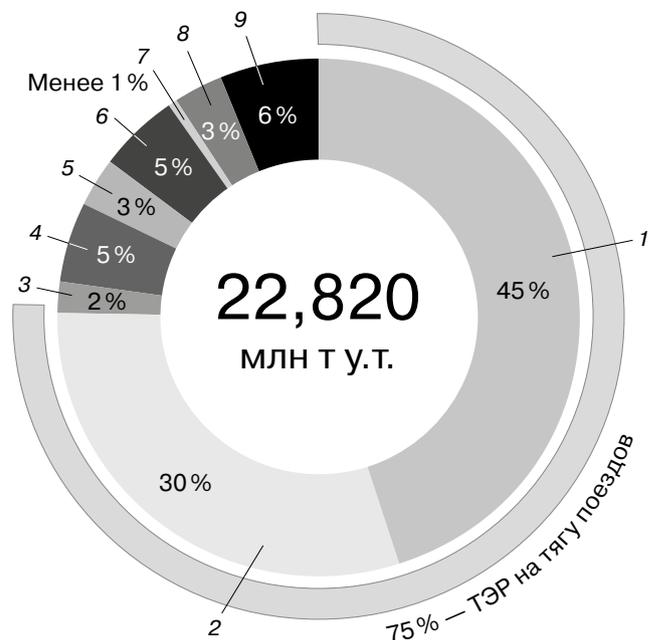


Рис. 1. Топливный баланс в ОАО «РЖД» в 2018 г.
 1 — электроэнергия на тягу поездов (42,7 млрд кВт·ч);
 2 — дизельное топливо на тягу поездов (2,4 млн т); 3 — дизельное топливо в стационарной энергетике (0,144 млн т); 4 — уголь (704 тыс. т); 5 — мазут топочный (289 тыс. т); 6 — газ природный (489 млн м³); 7 — бензин автомобильный (24 тыс. т); 8 — тепловая энергия со стороны (2,3 млн Гкал); 9 — электроэнергия в стационарной энергетике (5,8 млрд кВт·ч); ТЭР — топливно-энергетические ресурсы

Fig. 1. Fuel balance in the JSC “RZD” in 2018: 1 — electric power for train haulage (42.7 billion kWh); 2 — diesel fuel for train haulage (2.4 Mt); 3 — diesel fuel in the fixed power engineering (0.144 Mt); 4 — coal (704 kt); 5 — residual fuel oil (289 kt); 6 — natural gas (489 Mm³); 7 — gasoline (24 kt); 8 — external heat power (2.3 MGcal); 9 — electric power in fixed power engineering (5.8 billion kWh); ТЭР — fuel and energy resources

и конкурентных условиях. Литий-ионные батареи, которые являются одним из актуальных направлений замены дизельной тяги или бензиновых двигателей внутреннего сгорания на наземном транспорте, подвергаются серьезной критике с точки зрения их системной экологичности, возможности утилизации, вреда, наносимого окружающей среде при производстве элементов этих батарей, и сохранения зависимости от экологичности углеводородных тепловых электростанций, поставляющих электроэнергию для зарядки.

Наиболее перспективной альтернативой как дизельным, так и литий-ионным источникам энергии для тяги представляются водородные топливные элементы для генерации электрической энергии непосредственно на борту тягового подвижного состава.

Перспективы использования водородной энергетики. Объединенный ученый совет ОАО «РЖД» неоднократно рассматривал перспективу использования водородных топливных элементов на транспорте.

Таблица 1

Ключевые показатели водорода и других видов топлива

Table 1

Hydrogen key indicators and other types of fuels

Ключевые показатели	Водород	Другие виды топлива			
		Метан	Бензин	Дизтопливо	Метанол
Плотность, кг/м ³	0,0898	0,71	702	855	799
Низшая теплота сгорания (LHV) по массе, МДж/кг	120	50,4	42,7	41,9	19,9
Низшая теплота сгорания (LHV) по объему, МДж/м ³	10,8	36,1	31 200	36 500	18 000

Примечание. LHV — low heating value.

Стимулами для этой работы являются мировые тренды, экологические и энергетические требования мирового сообщества, наличие технологического опыта в оборонных отраслях [13].

Следует отметить, что к решению вопросов, связанных с водородной энергетикой, ОАО «Российские железные дороги» подступает довольно давно. Около 10 лет назад был начат эксперимент по созданию энергетической установки на топливных элементах. АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ») остается одной из немногих научных организаций, которые предприняли успешную попытку создания гражданского устройства на водородных топливных элементах достаточно большой мощности. Энергетическая установка была представлена на IV Международном железнодорожном салоне техники и технологий «ЭКСПО 1520» в г. Щербинка в 2013 г. Натурные испытания прошли успешно, и была подтверждена идея о возможности и целесообразности использования водорода для генерации энергии непосредственно на борту тягового подвижного состава. Притом что представленные для эксперимента водородные топливные элементы были созданы более 40 лет назад и спроектированы для других целей, они обеспечили работоспособность в условиях железнодорожного устройства, предназначенного для энергопитания путеремонтной техники в тоннелях. Опыт показал, что практическое применение водородной электрической тяги напрямую связано с созданием распределенной инфраструктуры заправки водородом.

Водород — перспективная энергетическая альтернатива. Энергетические свойства водорода хорошо изучены, и еще в XIX в. проводились исследования по использованию энергии водорода для получения электрической энергии. Многолетние эксперименты и фундаментальные результаты исследований позволили во второй половине XX в. создать работоспособные, применимые в космической и военной областях электрохимические генераторы на водородном топливе.

Уже в начале XXI в. водородная энергетика благодаря прорывам в области физики, электрохимии

и науки о материалах становится доступной для внедрения на транспорте.

Мировые тренды коммерческого использования топливных элементов (ТЭ) на транспорте базируются на уникальных свойствах водорода как топлива:

- высокой энергетической эффективности;
- экологичности;
- возможности обойтись без использования электрических сетей.

Следует отметить, что разработка и эксплуатация собственного электроподвижного состава на ТЭ в России перспективна как для применения в пригородных перевозках и экономии на электрификации железнодорожных линий при недостаточной интенсивности перевозок, так и для сокращения «углеродного влияния» железнодорожного транспорта на экологию.

Водород — уникальное единственное топливо, которое не имеет углеродного следа в выхлопе, обладает наилучшими энергетическими параметрами и может транспортироваться с мест производства (в том числе как побочный продукт) на любые расстояния. Ученые считают, что водород, помимо традиционных способов, можно транспортировать по нефтепроводам, смешивая его с нефтью и затем сепарируя смесь в нужном месте. Таким образом, масштабное внедрение транспортных средств на водородных топливных элементах может быть обеспечено развитой инфраструктурой заправки водородом.

Ключевыми показателями водорода являются:

- наибольшая массовая плотность энергии по сравнению с обычными видами топлива (коэффициент 2,4–2,7);
- наименьшая объемная плотность энергии, что означает необходимость сжатия (35 или 70 МПа) или сжижения ($T_{\text{сжиж}} = -253\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- отсутствие загрязнения окружающей среды, нетоксичность.

Энергетическая плотность водорода почти в 3 раза больше, чем у любого другого топлива, которое используется на транспорте (табл. 1).

Помимо экологической нейтральности водорода (продукт его сгорания — вода) по сравнению с углеводородным топливом (так как водород не содержится

в природе в чистом виде, фактически он является энергоносителем) его запасы на Земле практически неисчерпаемы, поскольку основными источниками добычи водорода служат вода, атмосферный воздух, природный газ. При этом помимо экологических последствий применения углеводородного топлива (уголь, нефть, сланцы) следует учитывать, что их запасы ограничены, а цены на их добычу постоянно растут в связи с труднодоступностью перспективных месторождений.

Технологическое и инновационное развитие открывает новые перспективы развития водородной энергетики. Видно, как изменялась мощность топливных элементов во времени. Сегодня этот показатель приблизился к снятию 1 Вт с 1 см², то есть в 5 раз больше, чем 30–40 лет назад [14]. Следовательно, эти элементы становятся более компактными, перспективными и эффективными для использования на железнодорожном транспорте.

Топливный элемент — устройство для получения электричества из водорода (или богатого водородом топлива) и кислорода без горения и преобразования тепловой энергии. Топливные элементы отличаются высокой энергоэффективностью и экологичностью, поскольку на выходе образуется только вода. Топливные элементы функционируют, вырабатывая электрический ток, пока поступает топливо (водород) и кислород, и не требуют зарядки от электрических сетей или источников. Существуют все возможности для того, чтобы изготавливать эти элементы в России. Самое дефицитное звено в этой конструкции — протонная мембрана, которая является главной составляющей в водородном топливном элементе. Она играет роль фильтра, который пропускает протоны, в дальнейшем открывающие дорогу для электронов в качестве носителя энергии.

При этом работа по внедрению водорода в Японии, Китае, Испании осуществляется на элементной базе, которая монополюно изготавливается в Северной Америке. Для России с учетом научно-технологических заделов такой подход неприемлем в силу собственного опыта и возможностей в этой сфере. Необходим системный межотраслевой подход к разработке отечественных водородных элементов, электрохимических генераторов для пригородных поездов и рельсовых автобусов.

Важно, что отечественные научные центры, в частности Институт проблем химической физики РАН, обладают технологиями производства протонных мембран, и при формировании соответствующего спроса в России может быть начат их выпуск, имеющий к тому же большую экспертную перспективу.

По оценкам А.Я. Фрейдзон, в настоящее время в разработках и в промышленности применяют топливные элементы на щелочной фосфорно-кислотной,

карбонатной, твердоотельно-оксидной основе, однако физико-химические и эксплуатационные параметры с точки зрения обеспечения нужд транспорта уступают топливным элементам с применением протонно-обменных мембран, которые по температурному режиму, проектной мощности, уровню КПД и скорости перехода в рабочее состояние более приемлемы для использования на транспорте. Протонно-обменные мембраны можно оценивать как более перспективные для применения на тяговом подвижном составе.

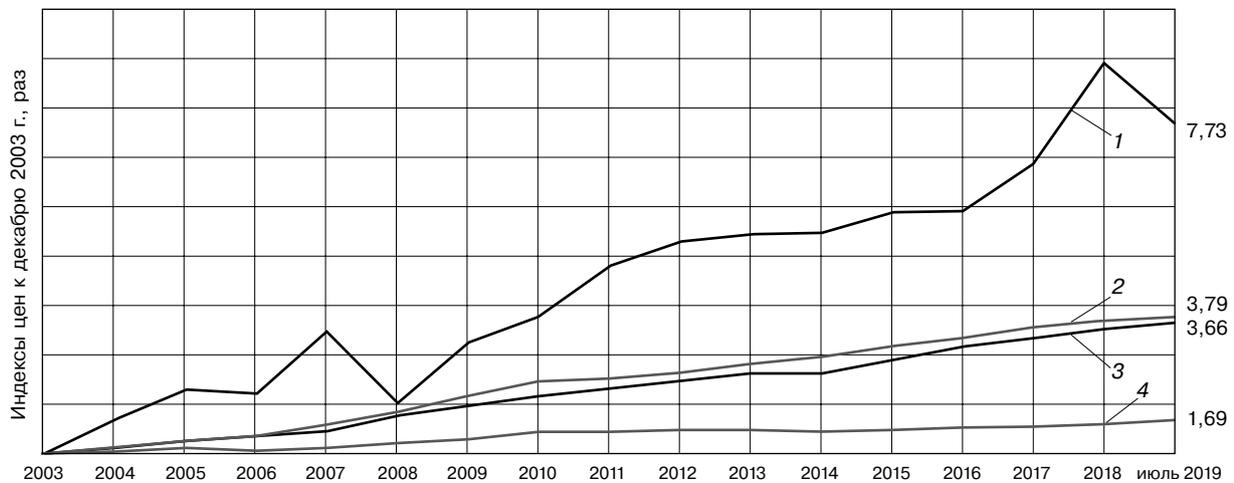
Преимущества водородных топливных элементов.

Современные топливные элементы представляют собой устройства, обеспечивающие получение электричества из водорода или богатого водородом топлива и кислорода без горения. Объединенный ученый совет ОАО «РЖД» считает, что в России существуют необходимые заделы для того, чтобы приступить к реальному внедрению подвижного состава на водородных топливных элементах.

Преимущества систем на топливных элементах:

- удельная энергоемкость систем на основе ТЭ многократно превышает энергоемкость любых аккумуляторных батарей. Данное преимущество позволяет сократить вес подсистемы энергообеспечения в 1,5–5 раз;
- возможность длительного хранения. Высокотемпературные твердо-оксидные топливные элементы и системы электропитания на их основе имеют гамма-процентный срок сохраняемости при $\gamma = 95\%$ не менее 15 лет;
- простота конструкции. Отсутствие движущихся и трущихся частей, систем смазки. Возможность эксплуатации в необслуживаемом режиме;
- емкость и мощность систем разделены, что позволяет гибко масштабировать тот или иной параметр отдельно в зависимости от целевого назначения системы и тем самым обеспечить формирование широкого типоряда электрохимических генераторов как по мощности, так и по энергоемкости. Высокий унификационный потенциал;
- энергоемкость не зависит от температуры окружающей среды;
- слабовыраженный тепловой след по сравнению с двигателем внутреннего сгорания и низкий уровень шума;
- отсутствие саморазряда и «эффекта памяти»;
- отсутствие необходимости в превентивной замене;
- высокий КПД (до 80 % и более);
- экологичность.

Как было отмечено выше, в МСЖД оценили, что к 2050 г. дизели на железных дорогах мира должны быть заменены. До 2050 г. осталось около 30 лет. Поскольку расчетный срок эксплуатации локомотивов, как правило, составляет 40 лет, производимые в ближайшие годы дизель-генераторные установки



* Источник: Росстат и статистическая отчетность ОАО «РЖД».

В 2004–2016 гг. для расчетов использовали индекс цен по виду экономической деятельности «Добыча каменного угля, бурого угля и торфа», в связи с отсутствием такого показателя в ОКВЭД-2 с 2017 г. используем индекс цен по виду экономической деятельности «Добыча угля»

Рис. 2. Динамика индексов цен производителей промышленной продукции и тарифов с 2004 г.*, рост к декабрю 2003 г.:
1 — производство дизельного топлива; 2 — электроэнергетика; 3 — железнодорожный тариф; 4 — доходная ставка ОАО «РЖД» на 10 т/км

* Source: Rosstat (Federal State Statistics Service) and statistical reports of the JSC "Russian Railways".

Price index by the type of activity "Mining of mineral coal, brown coal and turf" was used in 2004–2016; as this indicator is not available in OKVED-2 (Russian National Classifier of Types of Economic Activity) since 2017, the price index by the type of economic activity "Coal mining" is used

Fig. 2. Dynamics of price indices of industrial product manufacturers and tariffs since 2004*, and growth by December 2003:
1 — diesel fuel production; 2 — electric power engineering; 3 — railway tariff; 4 — revenue rate of JSC "RZD" per 10 t-km

окажутся экономически недоиспользованными. Отсюда можно сделать вывод об актуальности проблемы перехода на газовую и водородную энергетику.

Предпосылки внедрения подвижного состава на ТЭ на российских железных дорогах очень существенные (табл. 2), поскольку 41 тыс. км (практически 50 %) железных дорог неэлектрифицированы в основном из-за невысокого объема перевозок, при котором создание энергетической инфраструктуры неэффективно. И совсем другое дело, если электрификация будет осуществлена на элементах генерации, которые будут располагаться на самих локомотивах, региональных пассажирских поездах или рельсовых автобусах.

В начале массового внедрения ТЭ в тяговом подвижном составе их мощности будет достаточно для

использования в региональном сообщении и маневровой работе, однако эволюция технологий не исключает в перспективе и возможность применения водородных топливных элементов для грузового сообщения.

Необходимо также принимать во внимание непрерывное повышение цен на дизельное топливо, опережающее за последние 10 лет темпы индексации тарифов на железнодорожные перевозки более чем в 2 раза (рис. 2). С учетом перспективы существенного увеличения платы за экологические последствия эксплуатации двигателей внутреннего сгорания дизельное топливо становится достаточно тяжелым бременем для будущей эксплуатации, поэтому необходим поиск альтернативного топлива.

На Глобальной конференции Совета по железнодорожным исследованиям МСЖД в Варшаве доктор

Таблица 2

Предпосылки внедрения подвижного состава на топливных элементах для железнодорожного транспорта

Table 2

Prerequisites for the introduction of fuel cell rolling stock for railway transport

Мотивирующие факторы	Достижимые результаты
41,8 тыс. км (48,8 %) российских железных дорог не электрифицированы. На сети работают более 6400 дизельных локомотивов	Поездная и маневровая работа без выбросов для линий безконтактной сети
Повышение цен на дизельное топливо в среднесрочной и долгосрочной перспективе	Альтернатива ископаемому топливу
Законодательство и ожидания общества в отношении качества воздуха и снижения уровня шума	Сокращение выбросов и шума
Своевременная реакция на тенденции в мире и стране о запрете дизельного топлива	Закрепление лидирующих позиций железнодорожного транспорта

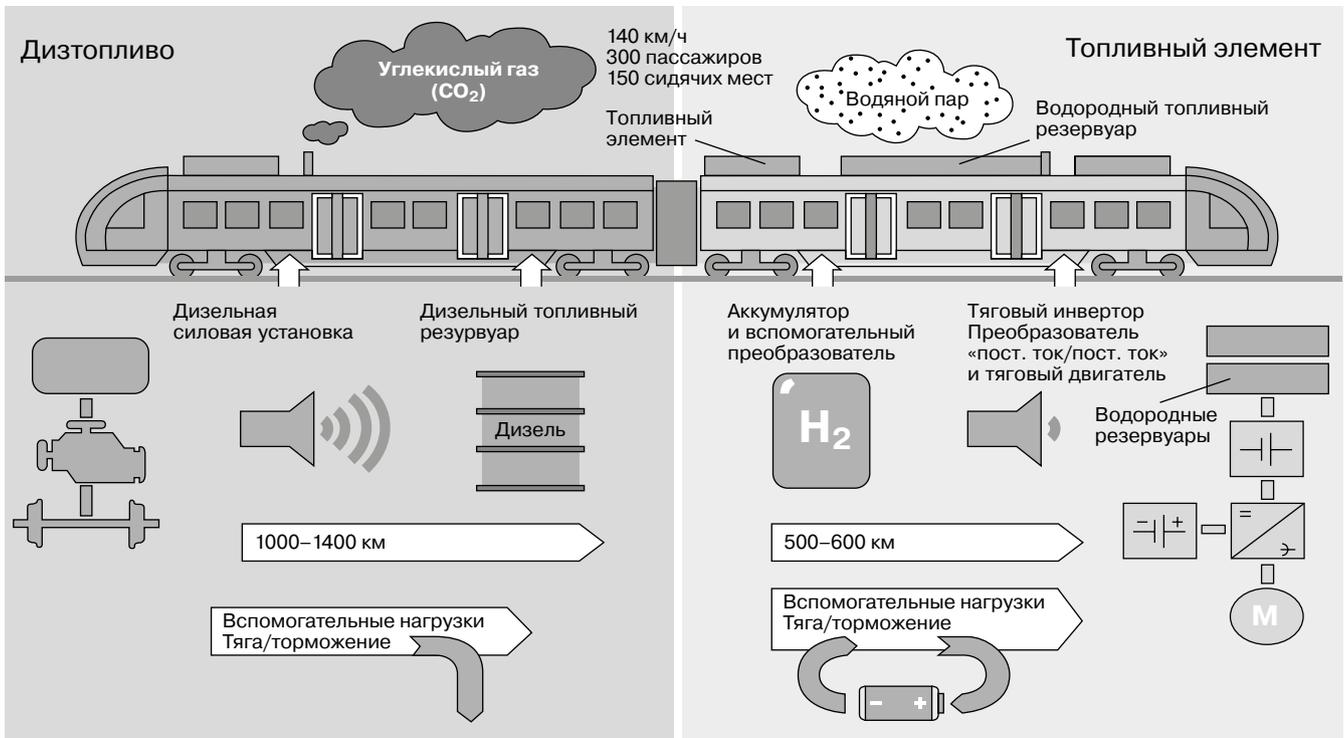


Рис. 3. Пример решения проблемы снижения выбросов CO₂ для региональных линий (Coradia iLint)
 Fig. 3. Example of CO₂ emissions reduction solution for regional lines (Coradia iLint)

Марк Энтони заявил, что с учетом технологической и экологической значимости переход от дизельной тяги к тяге на водородных топливных элементах можно расценивать как такой же эволюционный шаг, который был осуществлен при переходе от паровозной к дизельной тяге.

На рис. 3 показан поезд проекта Coradia iLint, который создан компанией «Альстом» для немецких железных дорог с целью замены дизельных поездов на поезда на экологически чистой тяге. Поезд успешно эксплуатируется в Нижней Саксонии, его перспективы очень широки, а технические характеристики вполне приемлемы для энергетического обеспечения пассажирского сообщения, маневровой работы, а в перспективе и для грузовой работы.

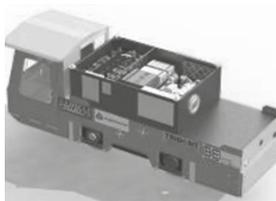
На рис. 4 показан опыт внедрения водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте. Трамваи, горнорудные и маневровые локомотивы, региональные поезда — все это не просто прототипы, а эксплуатируемая техника, в которой коэффициент полезного действия при использовании схемы водород–кислород может достигать 80 % и более [13].

МСЖД уже подготовил нормативную базу в виде стандартов по использованию водородных технологий на железнодорожном транспорте. При внедрении топливных элементов можно опираться на стандарты по производству, хранению и транспортировке водорода для тяги поездов, что позволит сделать проекты международными, а лидерам по производству

тягового подвижного состава на водородных топливных элементах успешно конкурировать на мировом рынке. Европейские страны системно занимаются внедрением водорода. В итальянском Больцано работают завод по производству водорода, завод по производству топливных элементов, заправочные станции, курсируют автобусы и такси на водороде. ЕС планирует весь скоростной коридор Мюнхен–Рим сделать «зеленым», включая использование автомобилей на водородных топливных элементах, которые гораздо более «дружественны к природе», чем аккумуляторные батареи, в том числе литий-ионные.

Руководство АО «Трансмашхолдинг» заинтересовалось созданием поездов на топливных водородных элементах. Эта тема — перспективная, потому что водородное топливо — мировой тренд, что проявляется не только в транспортной отрасли. Сегодня в РАН, при президенте РАН А. М. Сергееве, создана рабочая группа, в которую входят представители госкорпорации Росатом и АО «Трансмашхолдинг».

В начале сентября 2019 г. на Восточном экономическом форуме компании ОАО «РЖД», Росатом, Трансмашхолдинг и руководство Сахалинской области заключили соглашение о намерении объединения усилий для создания отечественного электроподвижного состава на водородных топливных элементах. Тем самым был сделан важный шаг для продвижения России по пути инновационных преобразований с целью опережающего развития.



Горнорудный локомотив (ЮАР, 2012)



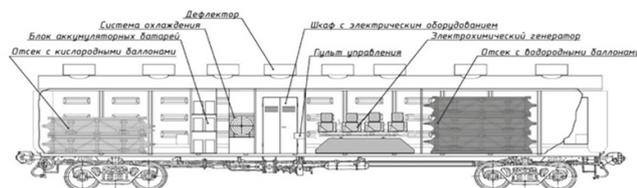
Трамвай (Испания, 2011)



Трамвай Qingdao (Китай, 2015)



Маневровый локомотив Green Goat (Колорадо, США, 2009)



Энергетическая установка на ТЭ (Россия, РЖД, 2013)



Пригородный пассажирский поезд (Япония, 2006)



Маневровый локомотив (США, 2009)



Поезд на водороде (Германия, 2018)



Поезд на водороде (Великобритания, 2019)

Рис. 4. Применение водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте
Fig. 4. Application of hydrogen fuel cells in railway transport

Переход автономной тяги на водородные топливные элементы рассматривается как приоритетный и в документе «Глобальное видение развития железнодорожного транспорта до 2050 года» Международного союза железных дорог. Авторами этого документа он определен как один из трех главных китов транспорта будущего: магнитной левитации, вакуумной левитации и водородных топливных элементов. С этими направлениями связано системное развитие железнодорожного транспорта и закрепление им лидирующих позиций на транспортном рынке.

Безопасность водородной энергетики на транспорте. Очевидно, что вопросы безопасности при использовании водорода являются приоритетными. Благодаря тому что водород в десятки раз легче воздуха, при правильных конструкционных решениях он не представляет опасности для окружающей среды, так как моментально растворяется в атмосфере даже при утечке из системы или на борту транспортного средства.

Повышенный нижний предел концентрации водорода, при котором образуются горючие смеси (4 против 1,1 % у дизельного топлива и 0,7 % у бензина), облегчает выявление опасных ситуаций с помощью специальных датчиков, позволяющих персоналу предотвратить пожар или взрыв. Перед началом эксплуатации ТЭ на автомобильном транспорте были проведены специальные опыты для изучения вопросов безопасности применения водорода (рис. 5). Во время экспериментов искусственно создавались утечка топлива и его воспламенение. Вследствие очень низкой плотности водорода пламя резко шло вверх и быстро гасло. Уровень безопасности использования водорода был признан выше, чем бензина. Это же подтверждает опытная эксплуатация автобусов: аварий с водородом не зафиксировано [13].

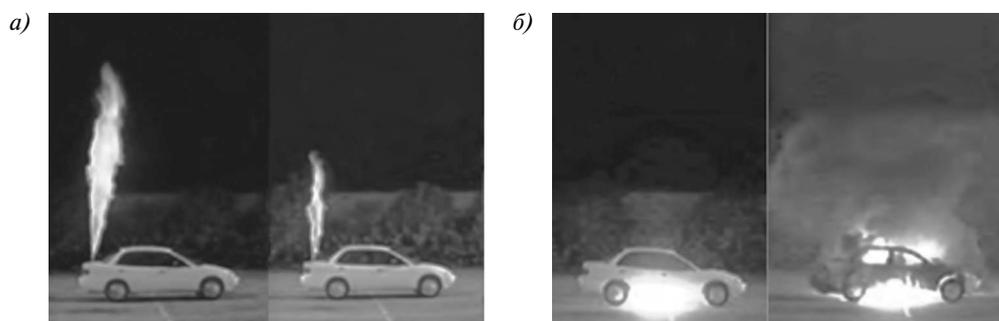
Эксперименты доказывают, что при правильно сконструированных устройствах водород не представляет опасности в эксплуатации.

Компетенции отечественной науки и промышленности, необходимые для создания водородных топливных элементов. Необходимо в полной мере задействовать научные и производственные организации, которые обладают возможностью для создания устройств, способных обеспечить инновационный прорыв, путем внедрения на железнодорожном транспорте водородной энергетики. Прежде всего это Институт проблем химической физики РАН, при котором работает Центр компетенций по технологиям новых и мобильных источников энергии.

Весьма широк спектр индустриальных партнеров Центра:

- ООО «ИнЭнерджи»;
- ООО «Электротранспортные технологии»;
- ООО «Научно-производственное объединение „Ижевские беспилотные системы“»;

Рис. 5. Эксперимент по выявлению распространения огня при возгорании топливных резервуаров автомобиля на водороде (а) и сжиженном газе (б)
 Fig. 5. Experiment of detecting the spread of fire in the event of ignition of vehicle fuel tanks with hydrogen (a) and liquefied gas (b)



- АО «Сарапульский радиозавод»;
- ООО «НПК Морсвязьавтоматика»;
- ООО «Конструкторское бюро Вуля»;
- ООО «Интеллектуальные силовые системы»;
- ПАО ОАК;
- ПАО Камаз;
- ЦИАМ им. П. И. Баранова;
- ООО «Литеко».

Партнерами Центра по научным исследованиям и образованию являются ведущие университеты и институты России:

- Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова;
- Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»;
- Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук;
- Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова;
- Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева;
- Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет).

Перечень проектов, выполняемых Центром, представлен в табл. 3.

Основные разработки Центра в области ТЭ:

- высокоэффективные модульные системы электропитания мощностью 1–10 кВт на основе топливных элементов в сочетании с дополнительными устройствами хранения электроэнергии и генерации водорода;
- резервные источники питания и полностью автономные системы электроснабжения на основе топливных элементов, в том числе в комбинации с возобновляемыми источниками электропитания;
- энергоустановки, работающие при температурах от –50 до +60 °С.

Следует отметить еще одного партнера для потенциального сотрудничества — Институт нефтехимического синтеза РАН, который имеет все возможности для создания российских топливных элементов. Институт проводит работу по следующим направлениям:

- получение и исследование перфторсульфонатных мембран, модифицированных неорганическими наночастицами;
- исследование химических реакций, протекающих на мембранных катализаторах различной природы;
- создание новых композитных мембранокаталитических систем и исследование их каталитических и мембраносепарационных свойств.

Таблица 3

Перечень потенциальных для использования на железнодорожном транспорте проектов, выполняемых Центром компетенций ИПХФ РАН

Table 3

List of potential projects that can be used in railway transport and that are to be fulfilled by the Institute of Problems of Chemical Physics of RAS

№	Проект	Ответственный участник консорциума
1	Разработка мобильного электрохимического генератора на топливных элементах с применением водородного топлива	ИХФ РАН, ООО «Инэнерджи»
2	Разработка функциональных материалов для получения водорода из неорганических видов топлива	ИПХФ РАН
3	Разработка новых проточных аккумуляторов повышенной мощности	Сколтех, ИПХФ РАН
4	Создание ходовых макетов транспортных средств с электрической пропульсивной установкой с электрохимическим источником тока в составе источника генерации энергии	ООО «ЭТТ», ИПХФ РАН (СКБ)
5	Создание полностью электрической летательной платформы самолетного типа и беспилотного летательного аппарата сельскохозяйственного назначения на его основе	ООО «Инэнерджи», ИПХФ РАН (СКБ)

Еще один партнер — Лаборатория полиэлектролитов и биополимеров химического факультета МГУ, которая разрабатывает полимерные материалы для электрохромических устройств и хранения и преобразования энергии, а также модифицирует мембраны с помощью нановолокон и нанотрубок.

Данной тематикой занимается АО «ВНИИЖТ», которое разработало действующий образец железнодорожной энергетической установки на топливных элементах для электропитания путевой техники. Институт приступил к работе над проектом гибридного локомотива на топливных элементах.

Направления работ и исследований АО «ВНИИЖТ» по рассматриваемой тематике:

- технико-экономическая оценка эффективности применения магистральных гибридных локомотивов. Компонентные решения, использование природного газа в качестве моторного топлива;

- создание макетных образцов локомотивов на топливных элементах;

- проведение исследований, в том числе совместно с АО «ВНИКТИ», ФГУП «Крыловский государственный научный центр», в целях:

- разработки технических требований к топливным элементам для локомотивов;

- создания нормативной базы для обеспечения безопасной эксплуатации технических средств на основе водородной энергетики;

- отработки технологий экипировки и транспортировки водорода;

- оценки потребности в силе тяги и мощности маневровых локомотивов, разработки типажа маневровых локомотивов;

- определения области применения водородной энергетики в различных хозяйствах ОАО «РЖД».

АО «ВНИКТИ» также разрабатывает гибридные энергетические установки с использованием эффекта сверхпроводимости.

Выводы. 1. **Водород, как чистый, безопасный и универсальный энергоноситель**, является частью экологического перехода и играет ключевую роль в создании возобновляемой энергосистемы и декарбонизации конечных областей применения. Водород — **единственный энергоноситель с нулевой эмиссией CO₂**.

2. Водородные технологии достаточно развиты и имеют значительный потенциал во всех сферах применения, в частности, там, где необходимы **высокая полезная нагрузка и автономия, а также гибкость**.

3. Создание рельсового электроподвижного состава на топливных элементах — мировой тренд транспортных инноваций. Важно, что в РФ сделаны научно-технологические заделы и разработаны технологии для создания прототипа электровоза

на ТЭ. Необходимые для этого научно-технологические компетенции рассредоточены по различным научным центрам, поэтому требуется их эффективная интеграция.

4. Промышленное производство критических топливных компонентов в РФ отсутствует, но может быть организовано при наличии спроса. Требуется единый заказчик и научный интегратор проекта создания электроподвижного состава на ТЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобзев С.А. О приоритетах в инновационной деятельности ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2019. № 2. С. 29–36.

2. Финансовая отчетность ОАО «РЖД» по РБСУ за 2018 год. Пояснения к бухгалтерскому балансу и отчету о финансовых результатах ОАО «РЖД» за 2018 год [Электронный ресурс]. URL: rzd.ru (дата обращения: 22.07.2019 г.).

3. Фюкс Р. Зеленая революция: экономический рост без ущерба для экологии: пер. с нем. М.: Альпина нон-фикшн, 2016. 330 с.

4. Лapidус Б.М., Мачерет Д.А. Влияние экологической парадигмы на долгосрочное развитие железнодорожного транспорта // Экономика железных дорог. 2016. № 9. С. 12–24.

5. Лapidус Б.М. Приоритетные направления железнодорожных исследований в рамках глобальной экономики // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2013. № 5. С. 1–10.

6. Лубину Ж.П. Железные дороги: эффективная основа европейской и евроазиатской транспортных систем // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2013. № 5. С. 11–14.

7. Устойчивое экономическое развитие в условиях глобализации и экономики знаний: концептуальные основы теории и практики управления / Д.Б. Берг [и др.]. М.: Экономика, 2007. 295 с.

8. A global vision for railway development II. International Union of Railways (UIR) / Ed. by B. Lapidus, A. Zurkowski, J. Wisniewski. International Union of Railways (UIR). Paris, 2019. 52 p.

9. Российский статистический ежегодник. 2018: стат. сб. М.: Росстат, 2018. 694 с.

10. Научное обеспечение инновационного развития и повышения эффективности деятельности железнодорожного транспорта / Б.М. Лapidус [и др.]. М.: MittelPress, 2014. 288 с.

11. Лapidус Б.М. Стратегические тренды развития железнодорожного транспорта // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2015. № 6. С. 2–9.

12. Анализ трендов развития электрогенерации и оценка перспектив применения инновационных энергоэффективных технологий на транспорте / А.Б. Косарев [и др.] // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2018. № 3. С. 11–22.

13. Григорович Д.Н. Формирование предложений по использованию водородного топлива на железнодорожном транспорте с учетом анализа зарубежного опыта // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2013. № 6. С. 37–50.

14. Водород стучится в двери [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gudok.ru/mechengineering/?ID=1475611> (дата обращения 31.08.2019 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ЛАПИДУС Борис Моисеевич,

д-р экон. наук, профессор, председатель Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 09.09.2019 г., принята к публикации 30.09.2019 г.

Improvements in energy efficiency and the potential use of hydrogen fuel cells in railway transport

B. M. LAPIDUS

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. This article presents the value of further increase of the energy efficiency in railway transport in combination with transition to the non-standard sources of energy. This is done within the paradigm of sustainable development and decarbonization in the global economy and by also taking into account the objectives stated in the document "Global perspective of railway transport development until 2050." Hydrogen fuel cells, which are being studied by the Technical and Scientific Council of the JSC "RZD", have demonstrated to be the most beneficial. The global trends of commercial use of fuel cells for transport are based on the unique properties of hydrogen as a fuel: high energy efficiency, ecological safety, and capability to be used without electric grids. Taking into account technological and ecological value, the transition from diesel traction to hydrogen fuel cell traction is justified and can be evaluated as a step of evolution that is as valuable as the transition from steam traction to diesel traction. Empirical proof is available that hydrogen is not hazardous to handle with properly designed equipment. The potential of the Russian science allows fulfilling appropriate research and development. We have taken into account that the required scientific and technological competences are available in different scientific centers and their effective integration is required. The conclusion states that the required conditions exist for introduction of the hydrogen fuel cells to the rolling stock in Russia. Although manufacturing of the critical fuel cells is not currently available in the Russian Federation, it can be arranged if demand is sufficient. This will require the collaboration of customers and scientific investigators in the project development of electric rolling stock in which hydrogen fuel cells can be used.

Keywords: railway transport; energy efficiency; decarbonization; sustainability of railway transport; hydrogen economy; fuel cells; global perspective of railway transport development

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-5-274-283>

REFERENCES

1. Kobzev S.A. *O prioritetakh v innovatsionnoy deyatel'nosti OAO "RZD"* [Priorities of innovative activities of the JSC "RZD"]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2019, no. 2, pp. 29–36.
2. *Finansovaya otchetnost' OAO "RZD" po RBSU za 2018 god. Poyasneniya k bukhgalterskomu balansu i otchetu o finansovykh rezul'tatakh OAO "RZD" za 2018 god* [Financial statement of the JSC "RZD" according to the Russian Accounting Standards for 2018. Explanations to the balance sheet and profit and loss statement of the JSC "RZD" for 2018]. URL: rzd.ru (retrieved on 22.07.2019) (in Russ.).
3. Fücks R. *Zelenaya revolyutsiya: Ekonomicheskiy rost bez ushcherba dlya ekologii* [Intelligent wachsen: Die grüne Revolution]. Moscow, Alpina non-fiction Publ., 2016, 330 p. (in Germ.).
4. Lapidus B. M., Macheret D. A. *Vliyaniye ekologicheskoy paradigmy na dolgosrochnoye razvitiye zheleznodorozhnogo transporta* [Effect of ecological paradigm on the long-term development of the railway transport]. *Railway Economy*, 2016, no. 9, pp. 12–24.
5. Lapidus B.M. *Prioritetnyye napravleniya zheleznodorozhnykh issledovaniy v ramkakh global'noy ekonomiki* [Priority areas of the railway research in the framework of global economy]. *Bulletin of the Scientific and Technical Council of the JSC "Russian Railways"*, 2013, no. 5, pp. 1–10.

6. Lubinu Zh.P. *Zheleznyye dorogi: effektivnaya osnova evropeyskoy i evroaziatskoy transportnykh sistem* [Railways — effective backbone of european and euro-asian transport systems]. *Bulletin of the Scientific and Technical Council of the JSC "Russian Railways"*, 2013, no. 5, pp. 11–14.

7. Berg D.B., Bol'shakov B.E., Gol'dshteyn S.L. *Ustoychivoye ekonomicheskoye razvitiye v usloviyakh globalizatsii i ekonomiki znaniy: kontseptual'nyye osnovy teorii i praktiki upravleniya* [Sustainable economic development in the conditions of globalization and economics of knowledge: conceptual bases of the theory and practice of management]. Moscow, *Ekonomika Publ.*, 2007, 295 p.

8. A global vision for railway development II. *International Union of Railways (UIC)*. Ed. by B. Lapidus, A. Zurkowski, J. Wisniewski. *International Union of Railways (UIC)*. Paris, 2019, 52 p.

9. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik. 2018*. [Russian statistical annual book. 2018] Statistical coll. of work. Moscow, *Rosstat Publ.*, 2018, 694 p.

10. Lapidus B.M., Macheret D.A., Fortov V.E., Zheleznov M.M., Makhutov N.A., Miroshnichenko O.F., Kolesnikov V.I., Levin B.A., Pekhterev F.S., Fomin V.M., Titov E.Yu., Rozenberg E.N., Kossov V.S., Vereskun V.D., Lapidus V.A., Bely O.V., Korchagin A.D., Ryskov A.V. *Nauchnoye obespecheniye innovatsionnogo razvitiya i povysheniya effektivnosti deyatel'nosti zheleznodorozhnogo transporta* [Scientific support of innovative development and enhancement of effectiveness of the railway transport]. Moscow, *Mitel Press Publ.*, 2014, 288 p.

11. Lapidus B.M. *Strategicheskiye trendy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta* [Strategic trends in the development of railway transport] *Bulletin of the Scientific and Technical Council of the JSC "Russian Railways"*, 2015, no. 6, pp. 2–9.

12. Kosarev A.B., Naumenko S.N., Zarucheisky A.V., Rebrov I.A. *Analiz trendov razvitiya elektrogeneratsii i otsenka perspektiv primeneniya innovatsionnykh energoefektivnykh tekhnologiy na transporte* [Analysis of trends in the development of power generation and assessment of the prospects for the use of innovative energy-efficient technologies in transport]. *Bulletin of the Scientific and Technical Council of the JSC "Russian Railways"*, 2018, no. 3, pp. 11–22.

13. Grigorovich D.N. *Formirovaniye predlozheniy po ispol'zovaniyu vodorodnogo topliva na zheleznodorozhnom transporte s uchetom analiza zarubezhnogo opyta* [Formation of suggestions on the usage of hydrogen fuel at the railway transport taking into consideration analysis of foreign experience]. *Bulletin of the Scientific and Technical Council of the JSC "Russian Railways"*, 2013, no. 6, pp. 41–50.

14. *Vodorod stuchitsya v dveri* [Hydrogen knocks on doors]. URL: <https://www.gudok.ru/mechengineering/?ID=1475611> (retrieved on 31.08.2019) (in Russ.).

ABOUT THE AUTHOR

Boris M. LAPIDUS,
Dr. Sci. (Econ.), Professor,
Chairman of Joint Scientific Council JSC "RZD", JSC "VNIIZhT"

Received 09.09.2019

Accepted 30.09.2019

■ E-mail: lapidusbm@mail.ru (B. M. Lapidus)