ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 629.113.001.25:628.5

ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИЛОВЫХ УСТАНОВОК НА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕЕ, ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ, ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ ГОРОДСКИХ АВТОБУСОВ В УСЛОВИЯХ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА

© А. В. Козлов[1], А. В. Порсин[1], Ю. А. Добровольский[2], А. М. Кашин[3], А. С. Теренченко[1], М. А. Горин[4], А. Н. Тихонов[5], К. В. Милов[1]

[1] ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 125438, г. Москва, Автомоторная ул., д. 2
[2] Институт проблем химической физики РАН,
142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр. Академика Семенова, д. 1
[3] АО «Группа компаний ИнЭнерджи»,
115201, г. Москва, 2-й Котляковский пер., д. 18
[4] Департамент транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры г. Москвы,
125993, г. Москва, 1-й Красногвардейский пр., д. 21, стр. 1
[5] ООО «УК «РОСНАНО»,
114292, г. Москва, пр. 60-летия Октября, д. 10А
E-mail: a.kozlov@nami.ru

Поступила в Редакцию 27 апреля 2021 г.
После доработки 29 апреля 2021 г.
Принята к публикации 25 мая 2021 г.

Проведен сравнительный анализ в жизненном цикле силовых установок на двигателях внутреннего сгорания, работающих на дизельном топливе и природном газе, аккумуляторных батареях и водородных топливных элементах. Собрана инвентаризационная информация для силовых установок по стадиям жизненного цикла: производство конструкционных материалов и сбор компонентов силовых установок, получение топлива и энергии, эксплуатация и утилизация по окончании срока службы. Представлены результаты комплексной оценки затрат энергии и выбросов CO_2 в жизненном цикле. Для комплексной оценки показателей использована структура производства электрической энергии, сложившаяся в Московском регионе. Проведена оценка стоимости водорода, при которой силовые установки на топливных элементах становятся экономически конкурентоспособными.

Ключевые слова: *автобусы; силовые установки; топливные элементы; водород; двигатель внутреннего сгорания; аккумуляторная батарея; жизненный цикл*
DOI: 10.31857/S004446182106013X

Урбанизация приводит к значительному концентрированию населения в городах. В 1950 г. 30% населения в мире проживало в городах, в 2018 г. — 55%. Согласно прогнозам, к 2050 г. уже 68% населения

будет проживать в городах.* Аналогичная тенденция отмечается и в Российской Федерации — в городских агломерациях проживает более половины населения [1], причем постоянно происходит миграция населения из малых городов в города с более высокой численностью населения.

Одновременно с урбанизацией происходит устойчивый рост автомобилизации. В Российской Федерации количество легковых автомобилей на 1000 человек с 2000 по 2019 г. выросло в 2.5 раза. Автомобильный транспорт в городах — основной источник выбросов вредных веществ в атмосферу. Доля выбросов вредных веществ от автомобильного транспорта в городах с населением более 1 млн чел. составляет 36–94%, в городах курортного значения — 69–98%.**

К вредным веществам, приводящим главным образом к парниковому эффекту, относятся монооксид углерода, оксиды азота N_xO_y, углеводороды, а также дизельная и бензиновая сажи, выбрасываемые в атмосферу в виде твердых частиц с большим количеством адсорбированных на них углеводородов [2]. Несмотря на широкое применение каталитических систем очистки отработавших газов и повышение эффективности систем очистки, полностью снизить эмиссию вредных веществ не удается.

Обеспокоенность изменением климата планеты из-за роста выбросов парниковых газов антропогенного происхождения привлекла внимание в первую очередь к выбросам CO_2. В мировой экономике на долю энергетики, транспорта и промышленности приходится выбросов CO_2 соответственно 41.7, 24.6, 18.4%.*** В Российской Федерации доли выбросов CO_2 от этих же секторов экономики соответственно составляют 57.8, 18.7 и 18.1%.****

Общепризнано, что при обеспечении пассажирских потоков общественный транспорт предпочтителен в сравнении с легковыми автомобилями, поскольку в этом случае количество выбросов вредных веществ и CO_2 в пересчете на одного пассажира значительно меньше [3–5]. Также важно, чтобы в общей структуре общественного транспорта увеличивалась доля транспорта с «нулевым» выбросом, к которому можно отнести электрический транспорт (в данном контексте под «нулевым» выбросом подразумевается отсутствие выбросов вредных веществ и CO_2 только в процессе эксплуатации транспорта).

В сегменте общественного транспорта основные источники выбросов вредных веществ — дизельные автобусы. Планы об отказе использования дизельных автобусов с последующей их заменой на автобусы с «нулевым» выбросом объявлены муниципалитетами многих столиц Европы и мира, включая Москву. К автобусам с «нулевым» выбросом относятся автобусы с электрической силовой установкой на основе перезаряжаемых энергоаккумулирующих систем, аккумуляторных батарей или суперконденсаторов, а также с водородными топливными элементами (ТЭ) (автобусы на ТЭ) [3, 6, 7]. В силовых установках для применения на транспортных средствах распространение получили низкотемпературные топливные элементы на базе протонообменных мембран, перспективы применения которых представлены в обзоре [8].

Существует мнение, что в случае перехода к автомобильному транспорту с электрической силовой установкой в целом выбросы вредных веществ не сокращаются, а возможно, и возрастают. При зарядке аккумуляторной батареи и получении водорода, используемого в топливных элементах в качестве топлива, потребляются сырьевые ресурсы и энергия, в результате чего выбросы вредных веществ просто «переносятся» от автомобиля и локализуются в местах получения энергии и водорода, переработки сырьевых ресурсов. Для некоторых случаев это действительно справедливо. Однако такое мнение, если оно не подтверждается комплексным исследованием и расчетами, является упрощенным и может приводить к неверным выводам. На протяжении последних 40 лет в мире активно развивались научные методы для комплексной оценки на основе анализа жизненного цикла транспортного средства, который включает в себя добычу сырья для производства транспортного средства и его частей, использование транспортного средства, переработку и утилизацию транспортного средства по окончании срока службы [9–17]. Оценка жизненного цикла (ОЖЦ) продукции используется для определения ее воздействия на окружающую среду, потребления энергии, стоимости продукции. Методология ОЖЦ унифицирована

---

* United Nations. Department of economic and social affairs. World Urbanization Prospects 2018. Highlights. https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf

** ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова», Росгидромет. Ежегодник. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2018 г. С. 84–164. http://voeikovmgo.ru/download/publikacii/2019/ejegodnik_zagr_atm_2018.pdf

*** Международное энергетическое агентство (International Energy Agency). Data and statistics. https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector

**** Международное энергетическое агентство (International Energy Agency). Data and statistics. https://www.iea.org/data-and-statistics?country=RUSSIA&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector

в виде международных стандартов и идентичных стандартов Российской Федерации.*

В свою очередь технологические процессы, применяемые на стадиях от добычи сырья до утилизации транспортного средства, являются основными составляющими жизненного цикла продукции. ОЖЦ применяется в отдельности по отношению к каждому из технологических процессов и открывает возможности их оптимизации. На стадии использования транспортного средства при ОЖЦ особое место занимают химические процессы получения углеводородных топлив и водорода. Одним из основных способов получения водорода является паровая конверсия природного газа [18]. Для хранения и транспортировки полученного водорода привлекательными являются технологии с использованием носителей водорода, основанных на жидких органических соединениях [19]. В частности, ОЖЦ химических процессов, относящихся к теме нашей работы, используется для нефтепереработки [20], производства водорода паровой конверсии природного газа газификацией угля, с использованием термохимических циклов, с улавливанием CO_2 [21, 22], газификацией биомассы [23], переработки отработавших аккумуляторных батарей [24].

Пожалуй, наибольшее влияние на выбросы парниковых газов в жизненном цикле транспортного средства оказывает вид используемого топлива, а также количество и вид потребленной первичной энергии при производстве электрической энергии и водорода.

Выбросы парниковых газов на 1 кВт·ч произведенной энергии могут различаться в 100 раз в зависимости от вида первичной энергии. Например, для ветровой генерации на 1 кВт·ч произведенной энергии выбросы парниковых газов составляют 9 г CO_{2e}, для солнечной энергетики — 32 г CO_{2e}, для геотермальной — 38 г CO_{2e}, для атомной энергетики — 66 г CO_{2e}, при сжигании угля — 1050 г CO_{2e} [25] (CO_{2e} — обозначение эквивалента диоксида углерода конкретного количества парникового газа, вычисляемого как масса данного парникового газа, умноженная на его потенциал глобального потепления**).

Структуры генерирующих мощностей различных государств, а также различных регионов в пределах одного государства значительно отличаются друг от друга и зависят от климатических и географических условий, доступности углеводородного топлива, природных ресурсов, уровня технологического развития и др. Поэтому не существует единой модели, приемлемой для всех случаев (стран, регионов), для обеспечения снижения выбросов парниковых газов, необходимость которого декларируется в Парижском Соглашении.

К настоящему времени опубликовано большое число исследований, посвященных автобусам, с географической привязкой к тому или иному региону, например для Испании (Мадрид) [26], Швеции (Стокгольм) [4], Польши, Чешской Республики [27], Канады (четыре провинции) [28], Китая [29], США [30], Аргентины, Бразилии и Чили [31].

Так, в исследовании [4], посвященном использованию электрических автобусов в Стокгольме, показано, что переход на электрические автобусы необязательно приводит к снижению эмиссии парниковых газов в жизненном цикле. Эмиссия парниковых газов автобусами с аккумуляторными батареями ниже, чем эмиссия дизельных автобусов, работающих на биотопливе первого поколения. В то же время применение биотоплива второго поколения, полученного, например, с помощью гидрообработки растительных масел, может дать дизельным автобусам конкурентное преимущество перед автобусами на аккумуляторных батареях.

В настоящее время в Китае, где угольная генерация в общей генерации энергии составляет почти 68%, автобусы на аккумуляторах и топливных элементах уступают дизельным автобусам в жизненном цикле по потреблению энергии и по выбросам парниковых газов [29]. Моделирование изменения структуры электрогенерирующих мощностей, при котором увеличивается доля возобновляемых источников энергии (солнечной энергии, энергии ветра, геотермальной энергии) и доля угольной генерации снижается до 7%, показывает, что выбросы парниковых газов могут быть снижены более чем в 5 раз. В Канаде в провинциях Квебек и Британская Колумбия преобладает гидроэнергетика; в Онтарио примерно одинаковые доли занимают тепловая энергетика, атомная энергетика и гидроэнергетика; в Альберте преобладает тепловая энергетика.

Для получения водорода в исследовании [28] было рассмотрено три способа: электролиз воды, термохимическое разложение воды в медно-хлорном термохимическом цикле и паровая конверсия метана. Выбор термохимического цикла основан на развитии

* ISO 14040:2006. Environmental Management — Life cycle assessment — Principles and framework (ГОСТ Р ИСО 14040–2010. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура). ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ГОСТ Р ИСО 14044–2019. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации).

** ГОСТ Р 56276–2014 /ISO/TS 14067:2013. Газы парниковые. Углеродный след продукции.

данной технологии в Канаде в комбинации с использованием энергии от ядерного реактора [32]. ОЖЦ автомобиля показывает, что только в одном способе переход от двигателей внутреннего сгорания (ДВС) к автомобилям на топливных элементах приводит к увеличению оксидов серы (SO_x), оксидов азота (NO_x) и твердых частиц. Это случай получения водорода электролизом в провинции Альберт, где в структуре генерирующих мощностей преобладает тепловая энергетика, в которой используется главным образом уголь (55%) и природный газ (40%). При этом выбросы CO и летучих органических веществ (ЛОВ) снижаются в 10 раз и более. Получение же водорода разложением воды в термохимическом цикле обеспечивает наименьшее количество выбросов всех вредных веществ (SO_x, NO_x, ЛОВ, CO, твердые частицы) для всех провинций независимо от структуры генерирующих мощностей этих провинций.

Другой пример того, как структура генерирующих мощностей влияет на удельные выбросы парниковых газов, представлен в работе [33]. Удельные выбросы парниковых газов на 1 МДж произведенной энергии составляют: в США — 0.214 г CO_{2e}, в Италии — 0.178 г CO_{2e}, во Франции — 0.026 г CO_{2e}. Представленный ряд коррелирует с уменьшением доли ископаемого топлива, используемого в общем производстве электроэнергии в стране: чем меньше доля, тем меньше удельные выбросы.

Комплексное исследование воздействия на окружающую среду при использовании автобусов на топливных элементах на территории США было проведено в исследовании [30]. Результаты показали, что воздействие зависит от способа производства водорода и структуры региональных электрогенерирующих мощностей, температуры окружающего воздуха, режимов эксплуатации автобусов и даже индивидуальной манеры вождения водителя. Переход от дизельных автобусов к автобусам на топливных элементах приводит к существенному снижению выбросов парниковых газов, включая ЛОВ, CO, NO_x, твердые частицы. Суммарное снижение выбросов парниковых газов составляет от 22 до 80%, если водород централизованно производится из природного газа методом паровой конверсии, и от 54 до 97%, если водород производится электролизом. Исключение составляют оксиды серы SO_x, выбросы которых возрастают при получении водорода паровой конверсией природного газа. При эксплуатации автобуса минимальный расход водорода наблюдается в температурном диапазоне окружающей среды 20 ± 5°C, когда потребление энергии на вентиляцию, отопление и кондиционирование кабины и салона автобуса минимально. На отопление энергии расходуется больше, чем на кондиционирование, когда температура окружающей среды отклоняется от 20°C на одинаковое количество градусов в меньшую и бóльшую сторону, и включается отопление или кондиционирование. При температуре 0°C на отопление и на вентиляцию расходуется 9 кВт мощности, при –25°C — примерно 23 кВт. Увеличение потребления энергии на вентиляцию, отопление и кондиционирование приводит к увеличению потребления водорода и, как следствие, к увеличению выбросов парниковых газов в жизненном цикле.

Наименьшее воздействие на окружающую среду можно получить, если в структуре генерирующих мощностей преобладает возобновляемая энергетика, гидроэнергетика, ядерная энергетика. Если преобладающей является угольная энергетика, то очевидно, что замена дизельных автомобилей на автомобили с электрической силовой установкой приведет к увеличению выбросов парниковых газов.

Единая энергетическая система России состоит из семи Объединенных энергетических систем (ОЭС).* Структура производства электрической энергии всей Единой энергетической системы РФ следующая (прогноз на 2022 г.): 20.9% — атомные электростанции, 17.4% — гидроэлектростанции, 61.4% — тепловые электростанции, возобновляемые источники энергии — 0.3%.** ОЭС отличаются друг от друга по структуре производства электрической энергии, иногда очень значительно. Например, доля гидроэнергетики в ОЭС Сибири за счет полноводных сибирских рек составляет 51.2%, тогда как в ОЭС Урала — 1.9%. Структура производства электрической энергии ОЭС Центра, в которую входит 19 субъектов Российской Федерации, в том числе Москва и Московская область: 43.5% — атомные электростанции, 2.0% — гидроэлектростанции, 54.5% — тепловые электростанции (из них газовые — 48. 3%, угольные — 2.6%, другие — 3.6%), возобновляемые источники энергии — 0%. Доля угольной генерации электрической энергии незначительна: примерно столько же, сколько и у ГЭС. Таким образом, структура производства электрической энергии ОЭС Центра вполне перспективна с той точки зрения, что переход к автомобильному транспорту с электрической силовой установкой

---

* Единый системный оператор единой энергетической системы. Единая энергетическая система России. https://so-ups.ru/functioning/ees/ees-2020/

** Министерство энергетики Российской Федерации. Об утверждении схемы и программы развития единой энергетической системы России на 2016-2022 гг. https://minenergo.gov.ru/node/5021

не должен приводить к увеличению выбросов парниковых газов (вредных веществ).

Благодаря прогрессу, достигнутому за последние 30 лет, в настоящее время наибольшее распространение в качестве перезаряжаемой энергоаккумулирующей системы в электромобилях получили литий-ионные аккумуляторы. В состав электрической силовой установки электромобиля на ТЭ также входит литий-ионная аккумуляторная батарея, емкость которой обычно в несколько раз ниже, чем на электромобиле, поскольку аккумуляторная батарея (АКБ) периодически подзаряжается во время движения электромобиля от батареи топливных элементов. В силу того что стоимость, масса и энергетические затраты на производство АКБ составляют значительную долю от величин соответствующих характеристик всего электромобиля, аккумуляторная батарея является неотъемлемой частью при оценке жизненного цикла как электрических автобусов, так и автобусов на ТЭ.

Итоги развития литий-ионных аккумуляторов представлены в ряде обзоров [34–37]. Известно, что характеристики литий-ионных аккумуляторов — емкость и напряжение единичного элемента, количество циклов заряда–разряда, удельная энергоемкость, диапазон рабочих температур и др. — определяются химическим составом катода и анода. В настоящее время в автомобилях используются аккумуляторы в основном с углеродным анодом и с катодами следующих составов: $LiFePO_4$ (LFP), $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ (NCA), $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$ (NMC) [38]. Основные недостатки литий-ионных аккумуляторов — снижение емкости в процессе заряда–разряда; длительный процесс заряда аккумуляторов; саморазряда при хранении при пониженных температурах; склонность к саморазогреву в результате нарушения температурного режима (так называемый тепловой разгон). Начавшийся тепловой разгон практически невозможно остановить, в итоге он приводит к возгоранию и даже взрыву АКБ.

В качестве альтернативы углеродному аноду на рынке доступен пока только литий-титанатный анод $Li_4Ti_5O_{12}$ (LTO). Достоинства аккумуляторов с литий-титанатным анодом (LTO-аккумуляторов): широкий рабочий температурный диапазон –30÷+60°C (даже при –30°C может быть доступно 80% его полной емкости [38]); способность выдерживать более 20 000 циклов заряда–разряда; возможность заряда батареи большими токами — ультрабыстрый заряд в течение 15–20 мин [39]; высокая термическая стабильность [40]; устойчивость к тепловому разогреву [41]. Главное препятствие для широкого применения LTO-аккумуляторов — их высокая цена. На рынке LTO-аккумуляторы занимают около 2%.* Кроме того, их низкая удельная энергоемкость ограничивает запас хода автобусов. В то же время безопасность, высокий ресурс и способность работать в широком температурном диапазоне делают LTO-аккумуляторы привлекательными для использования на автомобилях, в том числе на автобусах. Способность LTO-аккумуляторов работать при отрицательных температурах повышает надежность обеспечения пассажирских перевозок в холодных зимних условиях. В свою очередь быстрый заряд позволяет использовать стратегию заряда аккумуляторов непосредственно на маршруте, например на конечных остановках. Автобусы на LTO-аккумуляторах в комбинации с инфраструктурой для быстрого заряда эксплуатируются в Японии, Малайзии, Европе,** Объединенных Арабских Эмиратах (в Абу Даби),*** США (в Помоне).****

Надежность пассажирских перевозок — одно из главных условий жизнедеятельности любого мегаполиса. Москва является крупнейшим городом на Европейском континенте, в котором температура ниже –20°C не редкость. В московских электрических автобусах (электробусах) используются электрические силовые установки на основе литий-титанатной аккумуляторной батареи. В настоящее время более 40 маршрутов Москвы обслуживают около 500 автобусов с электрической силовой установкой.***** Все маршруты обеспечены необходимой инфраструктурой для быстрого заряда аккумуляторных батарей.

Очевидно, что небольшой запас хода московских электрических автобусов (50–60 км) ограничивает их использование территорией, где имеются зарядные станции. Автобусы на водородных топливных элементах имеют запас хода 300–450 км и могут быть использованы не столько как альтернатива электрическим автобусам на аккумуляторных батареях, а скорее как еще один вариант при обеспечении пассажирских перевозок.

---

* The rechargeable battery market and main trends 2016–2025. P. 43. http://www.watersmark.com/wp-content/uploads/2017/09/Pillot_Christophe2016-2025.pdf

** Toshiba. Electric bus. https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/application/ev-bus.html

*** Gulf Business. Abu Dhabi unveils fleet of electric buses. https://gulfbusiness.com/abu-dhabi-unveils-fleet-of-electric-buses/

**** Foothill Transit Agency Battery Electric Bus Progress Report Data Period Focus. 2020. NREL/PR-5400-76259. https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76259.pdf

***** Green car congress. Moscow launches its 500th electric bus; largest electric bus fleet in Europe. https://www.greencarcongress.com/2020/11/20201114-moscow.html

Цель работы — проведение сравнительного анализа в жизненном цикле показателей силовых установок на водородных топливных элементах, на литий-титанатной аккумуляторной батарее, а также на двигателях внутреннего сгорания, работающих на дизельном топливе и природном газе. Силовые установки предназначены для городского автобуса большого класса в Московском регионе. Сравниваемые показатели силовых установок: затраты энергии, выброс CO_2, экономические затраты.

Методическая часть

В качестве критериев оценки выбраны три показателя оценки жизненного цикла (ОЖЦ):

— расход энергии — характеризует суммарные затраты энергии в жизненном цикле;

— выброс CO_2 — характеризует суммарный выброс CO_2 в жизненном цикле;

— экономические затраты — характеризуют общие расходы на приобретение и эксплуатацию автобуса.

При проведении оценки жизненного цикла учитывались следующие стадии:

— стадия производства, которая включает процессы получения конструкционных материалов, их обработки, сборки компонентов и транспортного средства; производства эксплуатационных материалов и запасных частей;

— стадия производства топлив, электрической энергии;

— стадия эксплуатации, которая включает процессы эксплуатации автобуса, когда он совершает транспортную работу; процессы технического обслуживания и ремонта, в том числе замены компонентов, вышедших из строя;

— стадия утилизации, включающая процессы декомпозиции транспортного средства, переработку (рециклирование) материалов и захоронение отходов по окончании срока службы автобуса.

При проведении оценки жизненного цикла использована методика оценки показателей автомобилей и их силовых установок, разработанная во ФГУП «НАМИ» на основе международных стандартов по оценке экологической безопасности продукции в жизненном цикле, методики оценки показателей силовых установок и топлив в жизненном цикле [16, 17]. Математическая модель, используемая в методике, описывает материальные и энергетические потоки, а также экономические затраты в жизненном цикле.

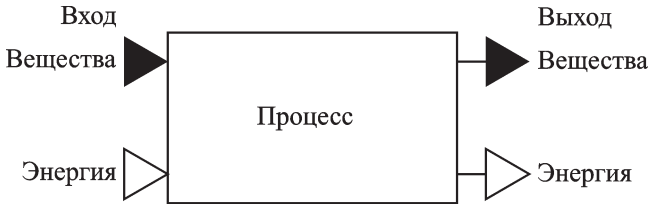

Рис. 1. Схема единичного процесса.

Любой единичный процесс, стадию жизненного цикла или продукционную систему в целом можно схематически представить в виде «черного ящика» (рис. 1).

Процесс имеет «Вход», т. е. входные потоки веществ и энергии, и «Выход», т. е. выходные потоки веществ и энергии. При моделировании любого процесса должны соблюдаться законы сохранения массы и энергии:

$$M_{\text{proc}}^{\text{in}} = M_{\text{out}}^{\text{proc}}, \quad (1)$$

$$E_{\text{proc}}^{\text{in}} = E_{\text{out}}^{\text{proc}}, \quad (2)$$

где M — поток массы; E — поток энергии (включая энергию, вносимую или выносимую с топливом или сырьем для его получения, а также затраты энергии на процесс и потери энергии в окружающую среду); индексы: in — входной поток, out — выходной поток, proc — идентификатор процесса. Эти законы должны соблюдаться на любом уровне иерархии процессов — от единичных, до жизненного цикла в целом.

Для каждого единичного процесса, стадии и жизненного цикла в целом рассчитываются показатели по следующей схеме:

— рассчитывается входной поток материалов,
— определяется входной поток энергии,
— рассчитывается выходной поток материалов,
— определяется выходной поток энергии,
— рассчитываются экономические затраты.

Объекты исследования

Расчеты проведены для пяти вариантов автобусов большого класса, различающихся силовыми установками. Учитывая тот факт, что кузов и шасси автобуса, элементы салона и многие другие компоненты во всех сравниваемых вариантах практически идентичны либо имеют очень близкие параметры, оценку проводили, принимая во внимание только силовые установки и отличительные компоненты, используемые в комплексе с соответствующими силовыми установками. Ниже представлены варианты силовых установок с компонентами:

— силовая установка на основе дизельного ДВС с системами охлаждения, питания, включая бак для топлива, системы впуска воздуха и выпуска с нейтрализатором отработавших газов, коробку перемены передач;

— силовая установка на основе газового ДВС, работающего на природном газе, с системами охлаждения, питания, включая баллоны для хранения компримированного газа на борту и газовую арматуру, системы впуска воздуха и выпуска с нейтрализатором отработавших газов, коробку перемены передач;

— силовая электрическая установка на основе LTO-аккумулятора емкостью 77 кВт·ч, включающая инвертор, электродвигатель с редуктором, систему термостатирования аккумуляторной батареи, систему охлаждения электродвигателя и электронных компонентов; используемый LTO-аккумулятор обеспечивает запас хода 50–60 км; данный вариант обладает характеристиками, близкими к характеристикам автобуса, используемого в Москве;

— электрическая силовая установка на основе LTO-аккумулятора емкостью 460 кВт·ч, включающая инвертор, электродвигатель с редуктором, систему термостатирования аккумуляторной батареи, систему охлаждения электродвигателя и электронных компонентов. Используемый LTO-аккумулятор обеспечивает запас хода автобуса около 250 км. Данный вариант рассмотрен для сравнения с силовыми установками на основе двигателей внутреннего сгорания, обеспечивающих соизмеримый запас хода автобуса;

— электрическая силовая установка на основе водородных топливных элементов, включающая систему топливных элементов, LTO-аккумулятор, инвертор, электродвигатель с редуктором, системы термостатирования аккумуляторной батареи и охлаждения топливного элемента, двигателя и электронных компонентов, системы подачи воздуха и водорода, включая баллоны для хранения водорода на борту.

Силовая установка на основе дизельного ДВС используется в качестве базового варианта для сравнения. Для корректного сравнения всех вариантов автобусов в жизненном цикле принят одинаковый период эксплуатации для всех автобусов, равный 12 годам, с пробегом около 800 тыс. км. Схема жизненного цикла автобусов с потоками веществ и энергии представлена на рис. 2.

Инвентаризационный анализ

Сбор инвентаризационных данных проведен из опубликованных источников [42–47] и баз данных инвентаризации жизненного цикла Ecoinvent [48], базы данных оценки жизненного цикла топлив и транспортных средств GREET*,**,*** [49], европейской справочной базы данных жизненного цикла (EPLCA)****, а также других опубликованных источников по получению топлив*****,****** [50–52], топливным элементам [53, 54], возобновляемой энергетике [55, 56]. Были получены данные по затратам энергии и удельным выбросам CO_2 в процессах:

— получения электроэнергии,

— производства топлив,

— получения конструкционных материалов,

— обработки материалов и сборки узлов в том числе аккумуляторных батарей,

— производства эксплуатационных материалов,

— утилизации отходов по окончании срока службы.

В рамках данной работы принято то, что электрическую энергию получают из Объединенной энергетической системы Центра со структурой производства энергии: на атомных электростанциях — 43.5%; на гидроэлектростанциях — 2.0%; на тепловых электростанциях — 54.5%, в том числе на газовых ТЭС — 48.3%; на угольных ТЭС — 2.6%; на других — 3.6%. Удельные затраты энергии при получении электроэнергии составляют 6.87 МДж·кВт$^{-1}$·ч$^{-1}$, а удельные выбросы CO_2 — 356 г·кВт$^{-1}$·ч$^{-1}$. При оценке жизненного цикла электрическая энергия расходуется главным образом на заряд аккумуляторных батарей и на получение водорода методом электролиза.

Рассмотрены три варианта получения водорода на крупнотоннажном производстве с последующей

---

* Argonne National Laboratory. GREET Model: The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model. 2019. https://greet.es.anl.gov/

** *Dai Q., Dunn J., Kelly J. C., Elgowainy A*. Update of Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries in the GREET Model. 2017. https://greet.es.anl.gov/publication-Li_battery_update_2017

*** *Kelly J., Dai Q., Elgowainy A.* Vehicle Materials: Fuel Cell Vehicle Material Composition Update. 2016 // Argonne National Laboratory. https://greet.es.anl.gov/files/fcv-composition-2016

**** European Platform on Life Cycle Assessment. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/datasetList.xhtml

***** *Canete V. I., Thunman H., Hanarp P., Magnusson I.* Synthesizing LCA reports on fuels for heavy duty trucks // F3 report. 2018. V. 12. https://f3centre.se/app/uploads/f3-21-17_Magnusson-et-al_final_180829.pdf

****** Range sourced from JEC «Well-to-Tank Appendix 4 — Version 4a: Description, results and input data per pathway» from «Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context». 2014. http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads

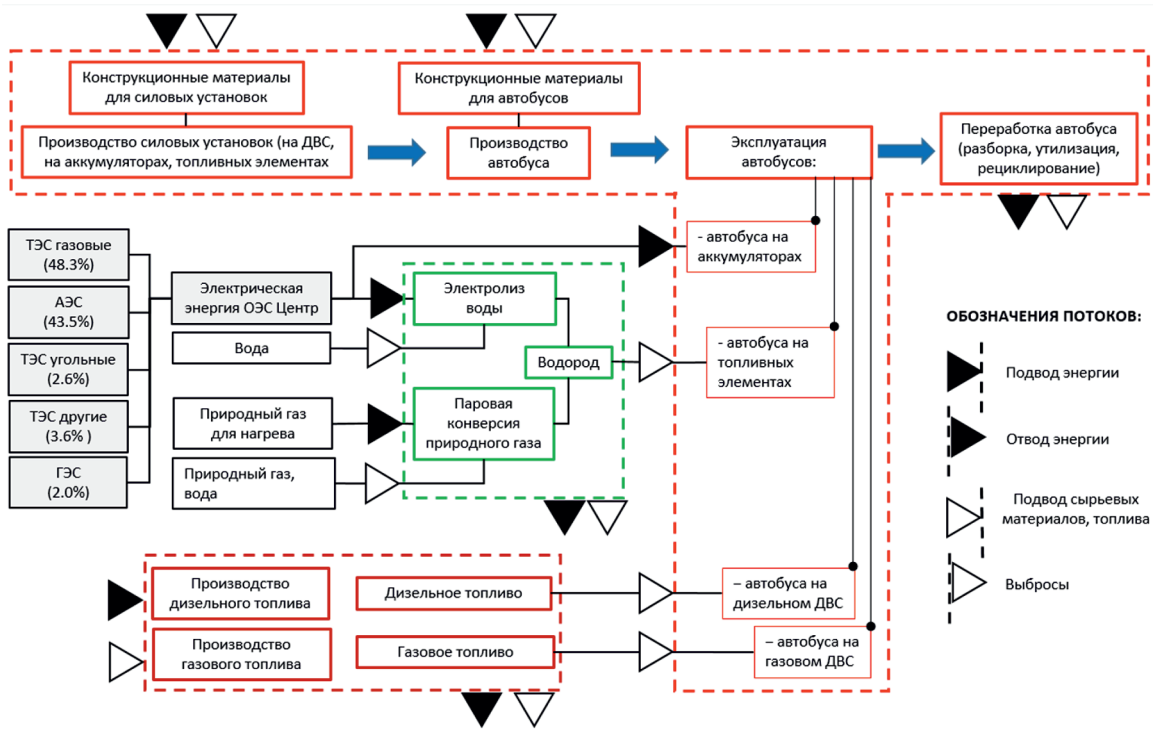

Рис. 2. Схема жизненного цикла автобусов с потоками веществ и энергии.
ТЭС — тепловая электростанция, АЭС — атомная электростанция, ГЭС — гидроэлектростанция.

доставкой водорода автомобильным транспортом в емкостях в компримированном состоянии:

— паровая конверсия природного газа без улавливания CO_2 (H_2 из ПГ),

— паровая конверсия природного газа с улавливанием CO_2 (H_2 из ПГ/CCUS*),

— электролиз воды с использованием электрической энергии от ОЭС Центра (H_2-электролиз).

Удельные затраты энергии на получение 1 кг водорода из природного газа в 12 раз выше, а при получении методом электролиза в 46 раз выше, чем при производстве 1 кг дизельного топлива (рис. 3). Удельные выбросы CO_2 при производстве водорода из природного газа без улавливания CO_2 примерно в 30 раз выше, а методом электролиза в 46 раз выше, чем при производстве дизельного топлива (рис. 4). Производство водорода из природного газа с улавливанием CO_2 позволяет снизить удельные выбросы CO_2 примерно в 10 раз по сравнению с производством водорода из природного газа без улавливания CO_2 (рис. 4), при этом удельные затраты энергии возрастают в 1.7 раза (рис. 3).

Аналогичным образом были подготовлены исходные данные по массе материалов, входящих в состав рассматриваемых вариантов силовых установок. На рис. 5 представлена структура по составу конструкционных материалов для традиционной дизельной силовой установки, для электрической установки на основе аккумуляторных батарей и для водородной установки на базе топливных элементов (с учетом перечня компонентов, приведенного выше).

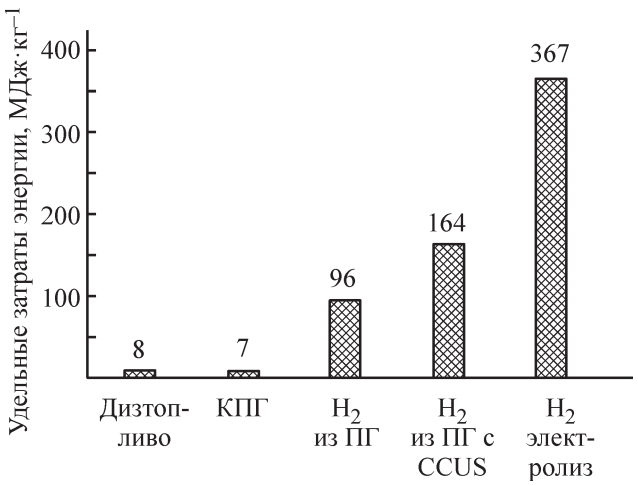

Рис. 3. Удельные затраты энергии при производстве 1 кг топлива.

* CCUS — Общепринятая международная аббревиатура для процесса улавливания, использования и хранения диоксида углерода (Carbon capture, use, and storage).

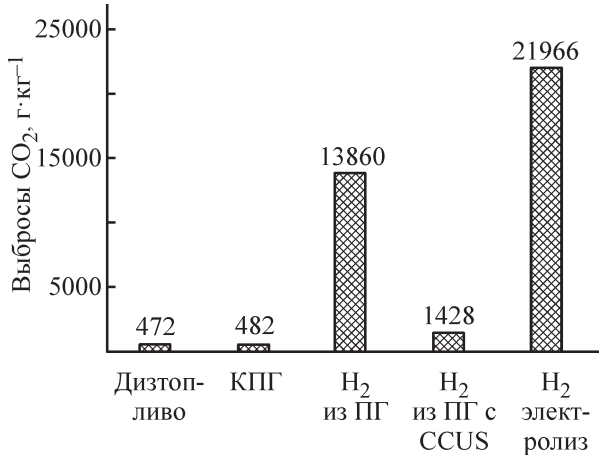

Рис. 4. Удельные выбросы CO_2 при производстве 1 кг топлива.

Традиционные силовые установки на основе ДВС состоят главным образом из стали (около 50%), чугуна — 20% и алюминия — 16%. Применение компримированного природного газа увеличивает долю алюминия до 25% вследствие его использования в системах хранения газового топлива. Переход на силовые установки на АКБ изменяет распределение по материалам: 19–24% массы всех материалов, используемых в компонентах электрической силовой установки, приходится на пентатитанат лития ($Li_4Ti_5O_{12}$), обозначенный на диаграмме как LTO, который является материалом анода тяговой аккумуляторной батареи, 24–30% — на алюминий, около 13% — на

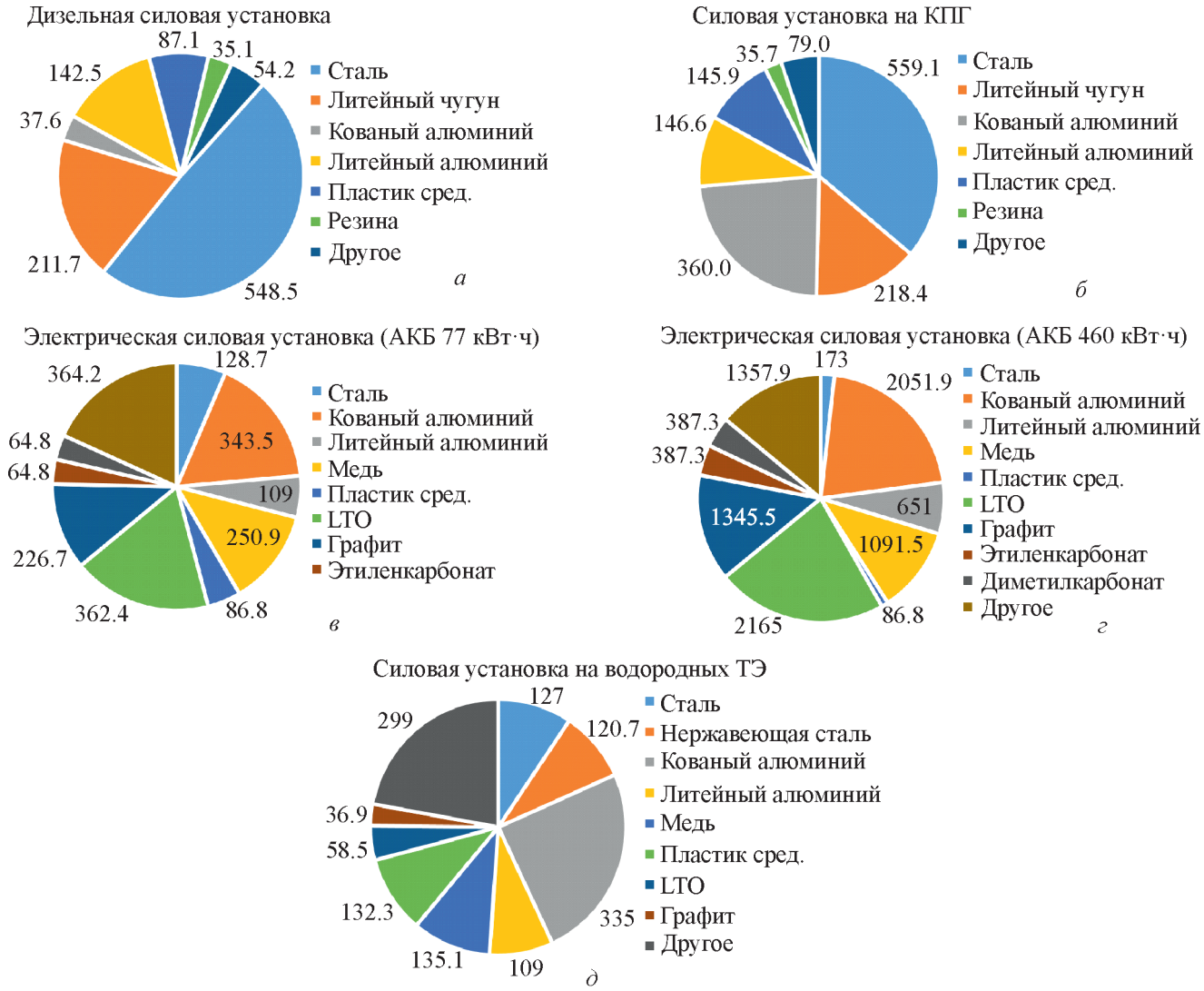

Рис. 5. Состав различных вариантов силовых установок (кг).

а — на дизельном ДВС, *б* — на газовом ДВС (на компримированном природном газе — КПГ), *в* — на АКБ емкостью 77 кВт·ч, *г* — на АКБ емкостью 460 кВт·ч, *д* — на водородных топливных элементах.

Таблица 1

Принятые для расчета расходы топлив, электроэнергии и выбросы CO_2 при эксплуатации городских автобусов с различными вариантами силовых установок

Вариант силовой установки	Расход топлива (электроэнергии) на 100 км	Выброс CO_2, г·км$^{-1}$
На дизельном двигателе	36.2 л	975
На газовом двигателе	48 м^3	938
Электрическая на АКБ	180 кВт·ч	—
На водородных ТЭ	9.0 кг	—

медь.* Использование водородных топливных элементов также изменяет распределение материалов: 35% массы всех материалов приходится на алюминий, 10% — на сталь и 9% — на пластики.

Эксплуатационный период для всех автобусов, сравниваемых в настоящей работе, одинаков и составляет 12 лет.

Оценка затрат энергии и выбросов на стадии эксплуатации производилась по данным о среднеэксплуатационном расходе топлива и потреблении электроэнергии городскими автобусами. Исходные данные по дизельным и газовым автобусам были получены на основании эксплуатации автобусов в Москве. При движении электрического автобуса, согласно исследованию [57], потребление электроэнергии составляет от 0.76 до 2.79 кВт·ч·км$^{-1}$. В настоящей работе для ОЖЦ использован расход электрической энергии 1.8 кВт·ч·км$^{-1}$. Согласно опубликованному в 2020 г. отчету об испытаниях автобусов на топливных элементах в рамках европейских проектов, средний расход водорода составляет 9 кг на 100 км.** Это значение принято в настоящей работе для ОЖЦ.

Данные по расходам топлив и электроэнергии и выбросам CO_2 представлены в табл. 1.

На электрических автобусах в Москве для отопления салона в зимнее время используются обогреватели, работающие на дизельном топливе, мощностью 35 кВт. Использование подобного обогревателя в настоящее время является нормальной мировой практикой для регионов с холодным климатом. Такая мощность соответствует по величине данным, опубликованным в исследованиях [58, 59]. Потребление электрической энергии вспомогательными системами при температуре –20°C составляет около 1.5 кВт·ч·км$^{-1}$ [58]. Потребление электрической энергии на отопление и вентиляцию составляет 25 кВт при –10°C [59], что в пересчете для средней скорости автобуса 20 км·ч$^{-1}$ составляет примерно 1.3 кВт·ч·км$^{-1}$. В настоящей работе принята модель работы дизельного обогревателя салона, в которой в среднем обогреватель работает на мощности 6.8 кВт в течение семи холодных месяцев. В этом случае средний выброс CO_{2e} в течение жизненного цикла составляет 84 г·км$^{-1}$.

Для расчета экономических затрат использовали цену дизельного ДВС, равную 933 800 руб., цену газового ДВС, равную 1 251 200 руб.

Цены на системы хранения топлив составили: для дизельного топлива — 8 380 руб., для КПГ — 530 тыс. руб., для водорода — 1020 тыс. руб.

Стоимость LTO-аккумуляторной батареи, согласно данным Международного энергетического агентства, колеблется от 473 до 1260 $/кВт·ч.*** В другом источнике стоимость LTO-аккумуляторной батареи составляет 563 $/кВт·ч [60]. С учетом прогнозируемого снижения стоимости LTO-аккумуляторов в расчетах принята стоимость 540 $/кВт·ч. В середине 12-летней эксплуатационной стадии в электрическом автобусе и в автобусе на топливных элементах осуществляется замена аккумуляторной батареи на новую с идентичными техническими характеристиками. При этом возможное снижение стоимости аккумуляторной батареи не учитывается.

Прогноз стоимости систем топливных элементов затруднителен из-за отсутствия массового производства и недостатка информации. Согласно данным Министерства энергетики США, опубликованным в 2021 г., приведенная себестоимость систем ТЭ при

* Update of Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries in the GREET Model. https://greet.es.anl.gov/publication-Li_battery_update_2017

** JIVE D3.24/JIVE 2 D3.7 Best Practice Report. https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/Best_Practice_Report_January_2020__JIVE_D3.24_JIVE_2_D3.7.pdf

*** Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (Internal Renewable Agency). IRENA. 2017. Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf

их массовом производстве составляет 76 $/кВт.* Приведенная себестоимость в данном случае означает, что она пересчитывается к ресурсу системы ТЭ, равному 8000 ч, с учетом того что придется изменять систему ТЭ и отдельные ее компоненты, если реальный ресурс системы ТЭ будет меньше этой величины. Пробег автобуса 800 тыс. км при 12-летней эксплуатации примерно эквивалентен 30 тыс. ч. Приведенная себестоимость к ресурсу 30 000 ч, полученная умножением 76 $/кВт на коэффициент 3.75 (3.75 = 30000:8000), составляет 285 $/кВт. В исследовании [61] себестоимость системы ТЭ автомобиля Mirai оценивается в диапазоне 220–245 $/кВт. На основе данных другого источника, в котором произведен детальный анализ стоимости систем ТЭ и ее компонентов, себестоимость блока топливных элементов (без учета вспомогательного оборудования) составляет примерно 330 $/кВт.** С учетом того что себестоимость вспомогательного оборудования будет стоить примерно столько же, себестоимость всей системы ТЭ можно оценить на уровне 660 $/кВт. Поскольку к себестоимости необходимо добавить прибыль, а также затраты, связанные с продажей, стоимость системы ТЭ будет выше. Согласно отчету консалтинговой компании Deliotte, через 5 лет ожидается снижение стоимости систем ТЭ для автобусов, учитывающее необходимую замену компонентов системы ТЭ, примерно до 700–800 $/кВт.*** В настоящей работе расчеты выполнены для стоимости системы ТЭ в диапазоне 300–800 $/кВт.

Данные о стоимости водорода, полученные из разных источников, имеют большой разброс и могут отличаться друг от друга в несколько раз. Стоимость водорода зависит от способа получения водорода, от стоимости используемой первичной энергии и используемого сырья. Согласно данным Международного энергетического агентства, диапазон стоимости водорода составляет****: 0.9–3.2 $/кг при получении водорода паровой конверсией природного газа без улавливания CO_2; 1.5–2.9 $/кг при получении водорода паровой конверсией природного газа с улавливанием CO_2. В настоящей работе принята стоимость водорода: 2.0 $/кг для паровой конверсии природного газа без улавливания CO_2; 3.0 $/кг для паровой конверсии природного газа с улавливанием CO_2. Стоимость электрической энергии, используемой для получения водорода электролизом воды и заряда аккумуляторов, принята на основании текущей цены электрической энергии для предприятий в Московском регионе. Цены на используемые топлива и электроэнергию представлены в табл. 2.

Обсуждение результатов

Наименьшие затраты энергии на стадии производства силовых установок — у силовых установок на дизельном ДВС, на газовом ДВС и на водородных ТЭ (рис. 6). Основной вклад в затраты энергии у силовых установок на ДВС вносит собственно двигатель внутреннего сгорания с его системами — около 40%. У электрических силовых установок на АКБ основная доля затрат энергии приходится на производство аккумуляторной батареи — 40–48%. У силовой установки на ТЭ около 28% расхода энергии приходится на производство системы топливных элементов и 16% на аккумуляторную батарею.

В отношении выброса CO_2 на стадии производства водородных силовых установок наблюдается похожее распределение между типами силовых установок (рис. 7). По сравнению с силовыми установками на ДВС для водородных силовых установок выбросы CO_2 выше на 7%, для силовых установок на АКБ емкостью 77 кВт·ч — на 35%, для силовых установок на АКБ емкостью 460 кВт·ч — в 7 раз.

В стадию производства силовых установок также включены компоненты и материалы, которые используются для проведения технического обслуживания, ремонта и замены вышедших из строя узлов в течение всего срока службы. В стадию производства электрических и водородных силовых установок включены аккумуляторные батареи, которые устанавливаются на автобусы при их первоначальной сборке, и аккумуляторные батареи, устанавливаемые при замене примерно в середине стадии эксплуатации.

---

* DOE Hydrogen and fuel cells program. Record #21001. 2021. Durability-Adjusted Fuel Cell System Cost. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/21001-durability-adjusted-fcs-cost.pdf

** U.S. Department of Energy. Manufacturing cost analysis of 100 and 250 kW fuel cell systems for primary power and combined heat and power applications. 2017. P. 40–41. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/02/f49/fcto_battelle_mfg_cost_analysis_100_250kw_pp_chp_fc_systems_jan2017.pdf

*** Deliotte China. Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf

**** Международное энергетическое агентство (International Energy Agency). The future of hydrogen. Seizing today′s opportunities. https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen

Таблица 2

Цены на топлива и электрическую энергию (на март 2021 г.), использованные в расчетах жизненного цикла

Вид топлива/электроэнергия	Цена
Дизельное топливо, руб./л	47.09
Компримированный природный газ, руб./м^3	19.5
Электроэнергия, руб./кВт·ч	5.54
Водород (паровая конверсия природного газа без улавливания CO_2), руб./кг	150.0*
Водород (паровая конверсия природного газа с улавливанием CO_2), руб./кг	225.0*

* Пересчет стоимости водорода, принятой в расчетах в американских долларах, в стоимость, выраженную в рублях, сделан по курсу 75 руб./$.

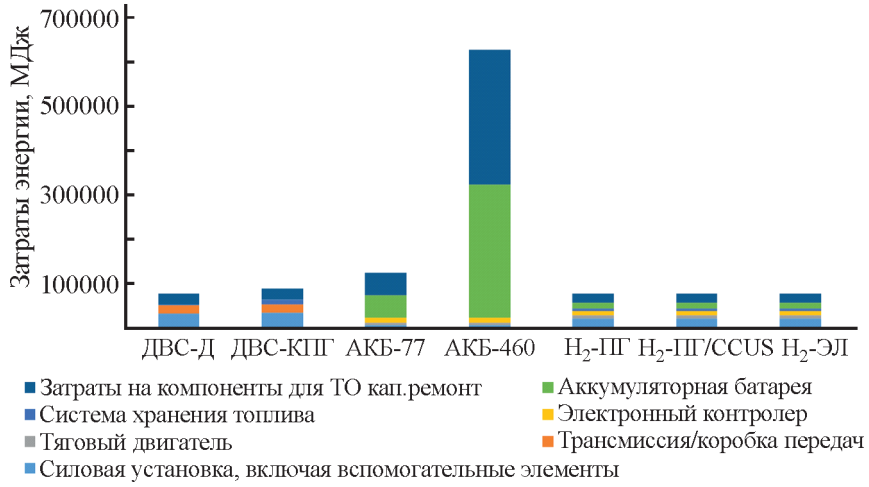

Рис. 6. Затраты энергии на стадии производства силовых установок.

ДВС-Д — силовая установка на базе дизельного ДВС; ДВС-КПГ — силовая установка на базе ДВС, работающего на компримированном природном газе; АКБ-77 — силовая установка на базе аккумуляторной батареи емкостью 77 кВт·ч$^{-1}$; АКБ-460 — силовая установка на базе аккумуляторной батареи емкостью 460 кВт·ч$^{-1}$; H_2-ПГ — силовая установка на ТЭ, работающая на водороде, полученном из природного газа (без улавливания CO_2); H_2-ПГ/CCUS — силовая установка на ТЭ, работающая на водороде, полученном из природного газа с улавливанием CO_2; H_2-ЭЛ — силовая установка на ТЭ, работающая на водороде, полученном электролизом воды.

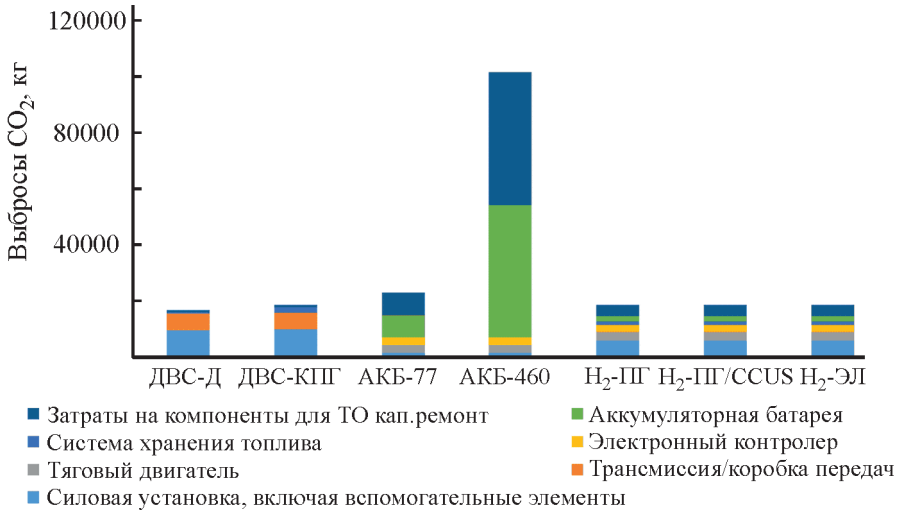

Рис. 7. Выбросы CO_2 на стадии производства силовых установок.

Затраты энергии на стадии производства электроэнергии для электрических силовых установок на АКБ примерно в 4 раза выше, чем при производстве дизельного топлива (рис. 8). Затраты энергии на получение водорода паровой конверсией природного газа примерно в 3 раза больше, а при улавливании CO_2 — в 5.5 раза больше, чем на получение дизельного топлива. Наиболее высокие затраты энергии наблюдаются при получении водорода методом электролиза воды, которые почти в 12 раз выше, чем при получении традиционного дизельного топлива.

Выбросы CO_2 при производстве электроэнергии для электрических силовых установок на АКБ примерно в 3.6 раза выше, чем при производстве топлив для силовой установки на дизельном ДВС и на газовом ДВС (рис. 9).

В сравнении с производством дизельного топлива при производстве водорода из природного газа (без улавливания CO_2) CO_2 выделяется больше в 7.6 раза, при производстве водорода электролизом — в 12 раз. Как было показано выше, соответствующие относительные различия для удельных выбросов CO_2 при производстве топлив составляют 30 и 46 (рис. 4). Значительное снижение относительных различий между выбросами CO_2 при переходе от удельных выбросов CO_2 к выбросам в стадии производства объясняется следующим. Благодаря более высокой удельной теплоте сгорания водорода по сравнению с удельной теплотой сгорания дизельного топлива и более высоким КПД силовой установки на ТЭ по сравнению с КПД силовой установки на ДВС для 12-летней эксплуатационной стадии автобуса необходима меньшая масса водорода, чем дизельного топлива. Тем не менее выбросы CO_2 на стадии производства водорода остаются значительно выше, чем на стадии производства дизельного и газового топлива.

Улавливание CO_2 при производстве водорода из природного газа обеспечивает самый низкий выброс CO_2 на стадии производства топлив и на 21% ниже, чем при производстве дизельного топлива.

В связи с тем что в ДВС преобразование энергии топлива в механическую работу производится с КПД 30–38%, самым низким по сравнению со всеми другими рассматриваемыми вариантами, затраты энер-

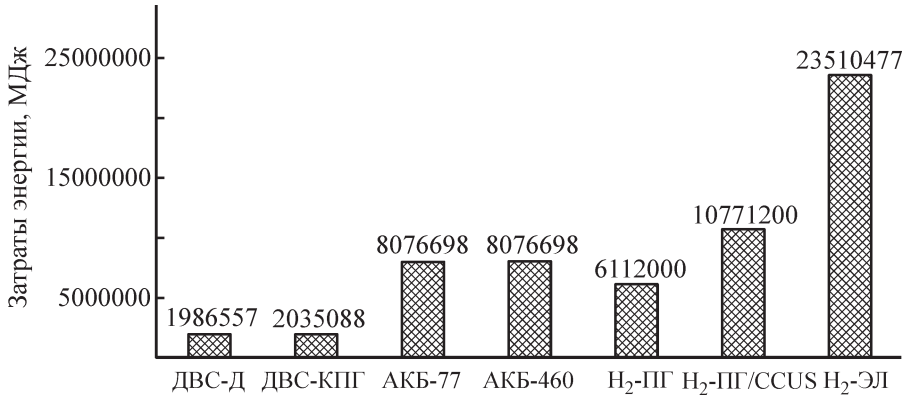

Рис. 8. Затраты энергии на стадии производства топлив и производства электроэнергии в количестве, необходимом для 12-летней эксплуатационной стадии.

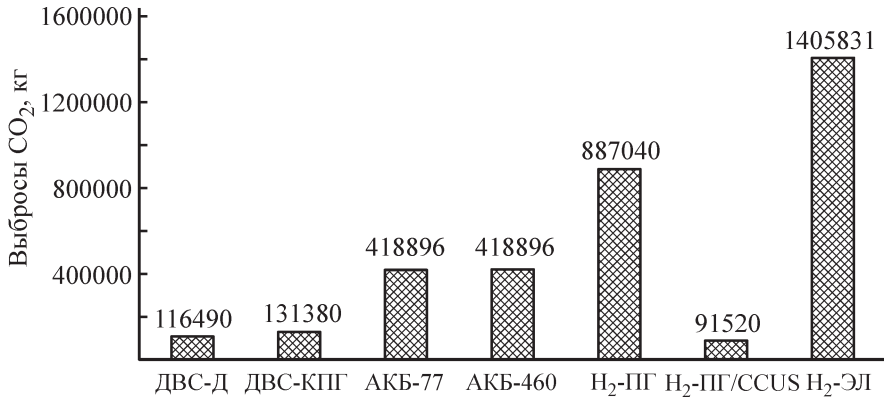

Рис. 9. Выбросы CO_2 на стадии производства топлив и производства электроэнергии в количестве, необходимом для 12-летней эксплуатационной стадии.

гии у данных вариантов наиболее высокие (рис. 10). Использование водородных топливных элементов позволяет снизить затраты энергии на стадии эксплуатации на 27% в сравнении с дизельной силовой установкой, что объясняется более высоким КПД топливного элемента (около 50–60%). В случае использования электрической силовой установки запасенная электрическая энергия преобразуется в механическую работу с наиболее высоким КПД (до 90%), что позволяет снизить затраты энергии более чем в 2.4 раза в сравнении с дизельной силовой установкой.

Выбросы CO_2 на стадии эксплуатации у силовых установок на базе ДВС примерно одинаковы, так как меньший удельный выброс CO_2 при сжигании метана компенсируется более низким КПД газовых двигателей (рис. 11). Выброс CO_2 в период эксплуатации у электрических автобусов связан с применением дизельного обогревателя салона, который в процессе работы сжигает дизельное топливо. Применение водородных топливных элементов позволяет полностью исключить выбросы вредных веществ и парниковых газов в процессе эксплуатации автобуса.

Стадия утилизации связана с переработкой конструкционных материалов, из которых была изготовлена силовая установка, а также с захоронением отходов по окончании срока службы автобуса. В расчетах для стадии утилизации также учитывается утилизация компонентов, использованных для ремонта и технического обслуживания силовых установок на протяжении жизненного цикла. На рис. 12 и 13 представлены результаты оценки для этой стадии. Наибольшие затраты энергии связаны с утилизацией аккумуляторных батарей, которые выше, чем затраты энергии на утилизацию дизельной силовой установки, для АКБ емкостью 77 кВт·ч$^{-1}$ в 34 раза, для АКБ емкостью 460 кВт·ч$^{-1}$ — в 200 раз. Затраты энергии на утилизацию водородной силовой установки примерно в 9 раз выше, чем у дизельной, и также связаны с необходимостью утилизации АКБ.

Выбросы CO_2, связанные с утилизацией силовых установок с АКБ, примерно в 4.6 и 27 раз выше для АКБ емкостью 77 и 460 кВт·ч$^{-1}$ соответственно, чем при утилизации дизельной силовой установки. Относительно более высокие выбросы CO_2 при утилизации водородной силовой установки (на 25%) также связаны с утилизацией АКБ.

В жизненном цикле затраты энергии на электрические силовые установки на базе АКБ, а также на силовую установку на ТЭ, работающую на водороде из природного газа (без улавливания CO_2), сопоста-

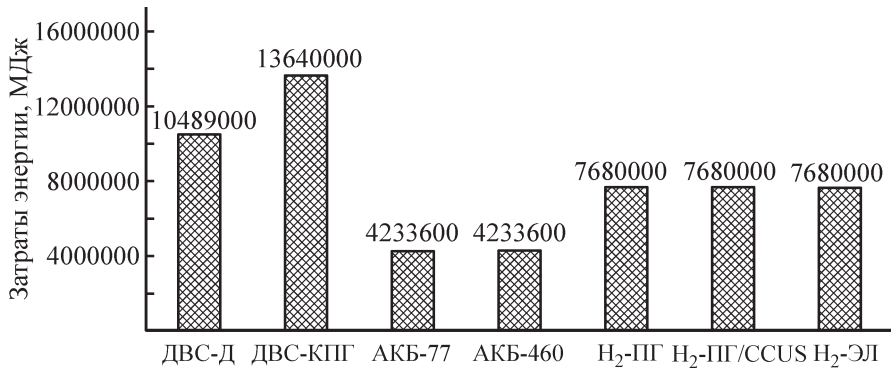

Рис. 10. Затраты энергии на 12-летней стадии эксплуатации автобусов.

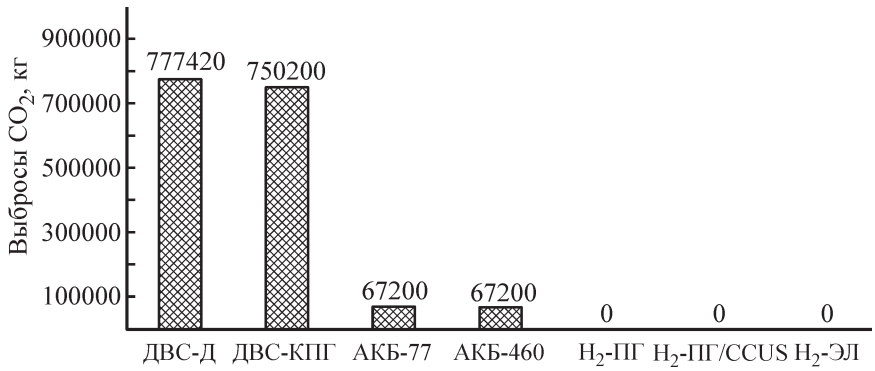

Рис. 11. Выбросы CO_2 на 12-летней стадии эксплуатации автобусов.

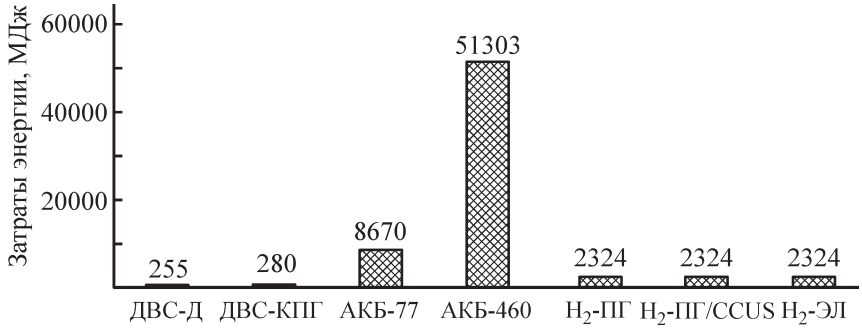

Рис. 12. Затраты энергии на стадии утилизации.

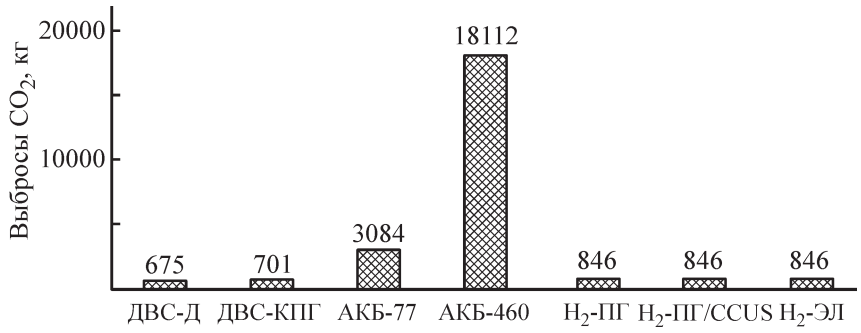

Рис. 13. Выбросы CO_2 на стадии утилизации.

вимы с затратами энергии на традиционной силовой установке на дизельном ДВС (рис. 14). Затраты энергии на силовую установку на ТЭ возрастают в зависимости от выбранной технологии получения водорода в ряду паровая конверсия природного газа без улавливания CO_2–паровая конверсия природного газа с улавливанием CO_2–электролиз воды. Затраты энергии на силовую установку на ТЭ при получении водорода методом электролиза в 2.5 раза выше, чем на дизельную силовую установку.

В жизненном цикле основной вклад в затраты энергии на силовые установки на базе ДВС вносят затраты энергии на стадии эксплуатации; для всех остальных типов силовых установок — на стадии производства топлив и электрической энергии и на стадии эксплуатации.

В жизненном цикле достигается снижение выброса CO_2 в сравнении с дизельной силовой установкой: при применении электрической силовой установки на АКБ емкостью 77 и 460 кВт·ч$^{-1}$ на 44 и 34% соответственно; при применении силовой установки на ТЭ (вариант H_2-ПГ/CCUS) — в 8.6 раза (рис. 15). Если улавливание CO_2 при паровой конверсии природного газа не осуществляется (вариант H_2-ПГ), то его выброс в жизненном цикле силовой установки на ТЭ сопоставим с выбросом для дизельной силовой

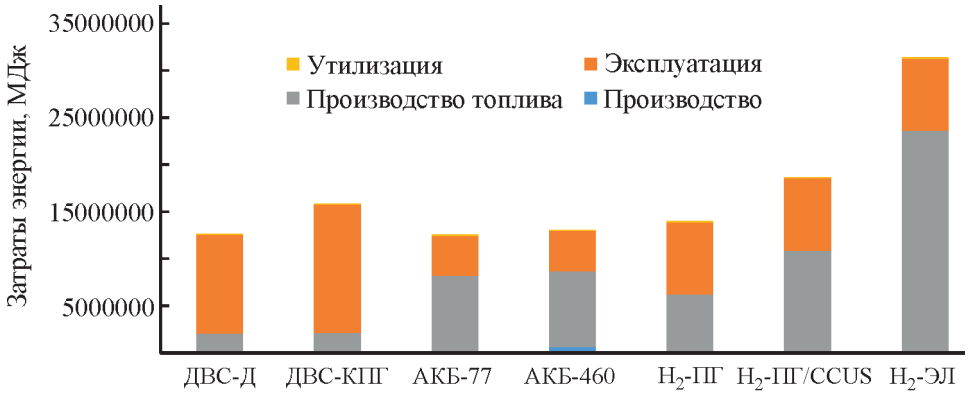

Рис. 14. Затраты энергии в жизненном цикле.

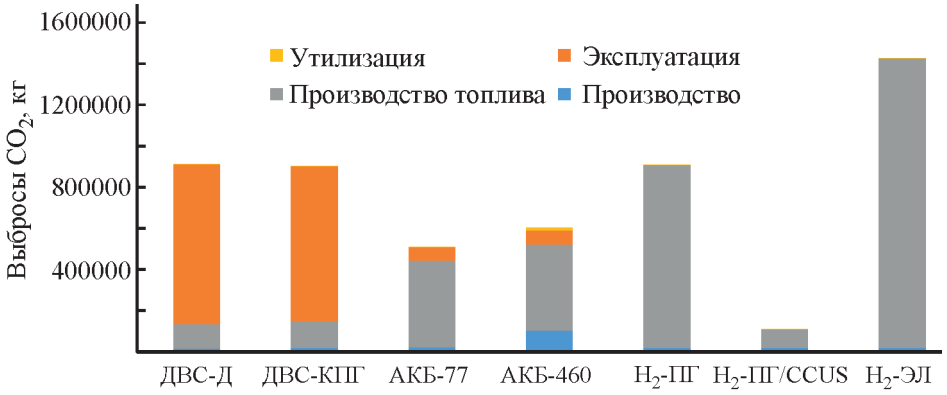

Рис. 15. Выбросы CO_2 в жизненном цикле.

установки. У силовых установок на ДВС выброс CO_2 преимущественно происходит на стадии эксплуатации, у силовых установок на АКБ и ТЭ — на стадии производства топлив и электрической энергии, что связано с большой долей производимой электроэнергии на газовых ТЭС в общей структуре производства электрической энергии ОЭС Центр.

Наибольшими экономическими затратами характеризуется силовая установка на АКБ емкостью 460 кВт·ч$^{-1}$ (рис. 16), так как АКБ имеет очень высокую стоимость и требует замены в процессе эксплуатации. Это приводит в итоге к увеличению экономических затрат в сравнении с дизельной силовой установкой в 2.9 раза. Наиболее экономически эффективны газовые автобусы, что связано с относительно низкой ценой природного газа (табл. 2), экономические затраты в их жизненном цикле примерно на 40% ниже, чем у дизельных автобусов. Экономические затраты в жизненном цикле на силовую установку на АКБ емкостью 77 кВт·ч$^{-1}$ по величине находятся между экономическими затратами на дизельную силовую установку и газовую силовую установку.

Экономические затраты на силовую установку на ТЭ состоят из двух составляющих: стоимости силовой установки и затрат на стадии эксплуатации. Увеличение стоимости системы на топливных элементах в пересчете на 1 кВт мощности с 300 (рис. 16, вариант *A*) до 800 $/кВт (вариант *B*) приводит к увеличению стоимости силовой установки на 3.7 млн руб. и соответствующему увеличению экономических затрат в жизненном цикле. Затраты на стадии эксплуатации включают затраты на топливо, эксплуатационные жидкости, запасные части для технического обслуживания и ремонта силовой

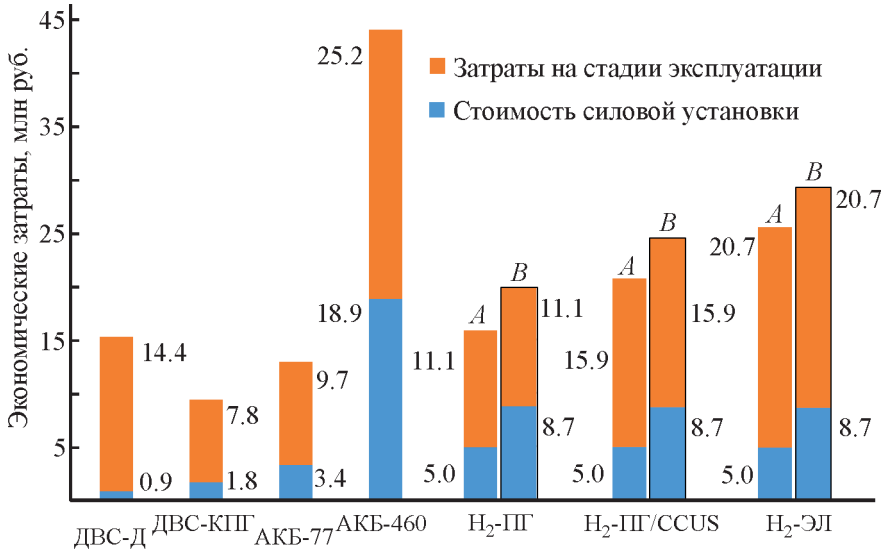

Рис. 16. Экономические затраты в жизненном цикле для различных типов силовых установок.
Варианты для стоимости системы ТЭ в пересчете на 1 кВт мощности: *A* — 22 500 руб./кВт (300 $/кВт), *B* — 60 000 руб./кВт (800 $/кВт); пересчет стоимости рубль–доллар сделан по курсу 75 руб./$.

установки. Наиболее экономически эффективно применение водорода, полученного методом паровой конверсии природного газа. В этом случае экономические затраты в жизненном цикле автобуса на ТЭ примерно на 5 (вариант *A*) и 29% (вариант *B*) выше, чем у дизельного автобуса. Увеличение затрат на стадии эксплуатации в ряду H_2-ПГ → H_2ПГ/CCUS → H_2-ЭЛ связано с увеличением затрат на производство водорода. Использование технологий улавливания CO_2 повышает стоимость водорода и приводит к увеличению экономических затрат на силовую установку на ТЭ в жизненном цикле соответственно на 37 и 59%, а использование метода электролиза воды увеличивает экономические затраты на 68 и 92% в сравнении с силовой установкой на дизельном ДВС.

Затраты на стадии эксплуатации для всех вариантов силовых установок на ТЭ вносят наибольший вклад в экономические затраты в жизненном цикле. Для уменьшения экономических затрат на силовую установку на ТЭ в жизненном цикле необходимо в первую очередь снизить стоимость водорода. Экономические затраты в жизненном цикле также сильно зависят и от стоимости системы ТЭ. При масштабировании водородных технологий и крупнотоннажном производстве водорода прогнозируется снижение стоимости водородного топлива. При стоимости системы ТЭ 22 500 руб./кВт (300 $/кВт) экономические затраты на ее применение сравняются с затратами на дизельную силовую установку при стоимости водорода около 140 руб./кг (рис. 17), а при стоимости системы ТЭ 60 000 руб./кВт (800 $/кВт) — при 85 руб./кг.

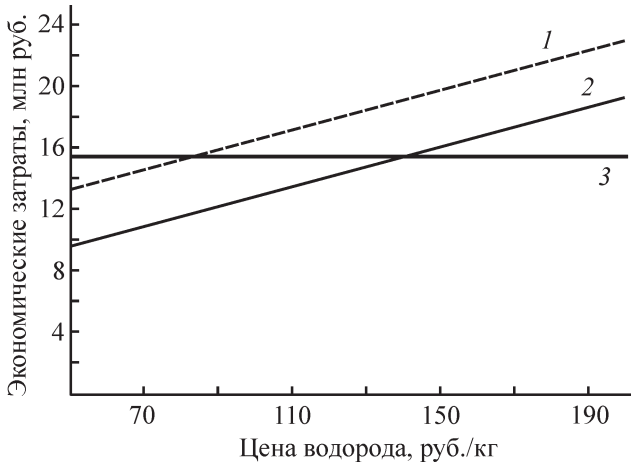

Рис. 17. Влияние стоимости водорода на экономические затраты в жизненном цикле для силовой установки на ТЭ, работающей на водороде, полученном паровой конверсией природного газа без улавливания CO_2.

1 — стоимость системы ТЭ 60 000 руб./кВт (800 $/кВт), *2* — стоимость системы ТЭ 22 500 руб./кВт (300 $/кВт); *3* — силовая установка на дизельном ДВС (для сравнения).

Выводы

При переходе на городском автобусе большого класса от силовых установок на дизельном ДВС и газовом к силовым установкам на аккумуляторных батареях и топливных элементах происходит существенное перераспределение затрат энергии и выброса CO_2 между стадиями жизненного цикла. Значительная доля затрат энергии и выброса CO_2 смещается от стадии эксплуатации к стадии производства топлива и электроэнергии. При этом сложившаяся структура производства энергии Объединенной энергетической системы Центра, обеспечивающей электрической энергией Московский регион, позволяет снизить в жизненном цикле суммарный выброс CO_2 электрических автобусов с силовыми установками на аккумуляторных батареях. Затраты энергии для силовых установок на АКБ в жизненном цикле соизмеримы с затратами для силовых установок на ДВС.

Из-за того, что в автобусах с силовыми установками на АКБ для отопления салона используется обогреватель, работающий на дизельном топливе, на стадии эксплуатации имеются выбросы CO_2, такие автобусы нельзя отнести к автобусам с «нулевым выбросом». Электрический автобус с аккумуляторной батареей емкостью 77 кВт имеет небольшой запас хода (50–60 км), что ограничивает выбор маршрутов для такого автобуса существующей зарядной инфраструктурой. Дополнительный расход электрической энергии от АКБ кратно снижает запас хода автобуса из-за резкого возрастания потребления электрической энергии на отопление пассажирского салона и кабины водителя, а также вспомогательными системами в зимних условиях, вследствие чего электрический вариант отопления неприемлем. Увеличение же емкости литий-титанатной аккумуляторной батареи до 460 кВт·ч$^{-1}$ приводит к значительному увеличению стоимости силовой установки.

Количество выброса CO_2 в жизненном цикле силовых установок на ТЭ зависит от способа получения водорода. При получении водорода паровой конверсией природного газа без улавливания CO_2 затраты энергии, выброс CO_2, а также экономические затраты в жизненном цикле отличаются незначительно от соответствующих параметров для дизельной силовой установки. Затраты энергии и экономические затраты возрастают в следующей последовательности: паровая конверсия природного газа без улавливания

CO_2–паровая конверсия природного газа с улавливанием CO_2–электролиз воды. Использование водорода, получаемого паровой конверсией природного газа с улавливанием CO_2, обеспечивает минимальный выброс CO_2 в жизненном цикле для всех рассмотренных вариантов силовых установок. Использование водорода, полученного электролизом воды, приводит также к значительному увеличению выбросов CO_2, что связано с относительно большой долей генерации электрической энергии на ТЭС в ОЭС Центр.

В целом экономические затраты в жизненном цикле на силовые установки, работающие на топливных элементах, определяются стоимостью водорода и стоимостью системы топливных элементов. Прогнозы стоимости водорода и стоимости системы топливных элементов характеризуются большим разбросом, что связано с различным технологическим уровнем, различной стоимостью и доступностью первичных источников энергии и сырьевых ресурсов в разных странах. Экономические затраты на силовые установки на ТЭ выше, чем экономические затраты на силовые установки на ДВС и аккумуляторных батареях.

Однако на выбор типа силовой установки влияют не только экономические затраты. Силовые установки на ТЭ имеют большой потенциал в части улучшения качества воздуха и снижения выброса CO_2. При использовании силовой установки на топливных элементах возможно полное исключение выброса CO_2 на стадии эксплуатации за счет отказа от дизельного обогревателя в сравнении с автобусом на дизельной силовой установке. Преимуществом автобуса на ТЭ перед автобусом на АКБ емкостью 77 кВт·ч$^{-1}$ является более высокий запас хода, который определяется количеством водорода, заправляемого в топливные емкости. Более высокий запас хода делает автобус на ТЭ более гибким с точки зрения определения маршрутов и позволяет расширить ареал использования автобусов с «нулевым» выбросом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

Разработка концепции исследования — А. С. Теренченко, Ю. А. Добровольский; разработка методической части расчетных исследований — А. В. Козлов, А. С. Теренченко; инвентаризационный анализ технических и экологических показателей силовых установок — М. А. Горин, А. С. Теренченко; инвентаризационный анализ экономических показателей топлив и силовых установок — А. Н. Тихонов, А. В. Порсин, А. М. Кашин; проведение расчетных исследований — А. В. Козлов, А. М. Кашин, К. В. Милов; анализ и обсуждение результатов расчетных исследований — все авторы; написание текста статьи, подготовка иллюстрационного материала — А. В. Козлов, А. В. Порсин.

Информация об авторах

Горин Максим Андреевич,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7961-6577
Добровольский Юрий Анатольевич, д.х.н.,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2163-6863
Кашин Алексей Михайлович,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7940-0001
Козлов Андрей Викторович, д.т.н.,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9915-7379
Милов Константин Владимирович,
ORCID: htps://orcid.org/0000-0002-3668-8850
Порсин Андрей Викторович, к.х.н.,
ORCID: https://orcid.org/000-0002-6928-1950
Теренченко Алексей Станиславович, к.т.н.,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1371-3179
Тихонов Алексей Никитович,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6563-7078

Список литературы

[1] Устойчивое развитие городов. Коллективная монография / Под ред. К. В. Папенова, С. М. Никонорова, К. С. Ситкиной. М. : Экономический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2019. 288 с.

[2] *Collura S., Chaoui N., Azambre B., Finqueneisel G., Heintz O., Krzton A., Koch A., Weber J. V.* Influence of the soluble organic fraction on the thermal behaviour, texture and surface chemistry of diesel exhaust soot // Carbon. 2005. V. 43. N 3. P. 605–613. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.10.026

[3] *Logan K. G., Nelson J. D., Hastings A.* Electric and hydrogen buses: Shifting from conventionally fueled cars in the UK // Transportation Research. Part D. 2020. V. 85. ID 102350. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102350

[4] *Xylia M., Leduc S., Laurent A.-B., Patrizio P., Meer Y., Kraxner F., Silveira S.* Impact of bus electrification on carbon emissions: The case of Stockholm // J. Cleaner Production. 2019. V. 209. P. 74–87. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.085

[5] *Spreafico C., Russo D.* Exploiting the scientific literature for performing life cycle assessment about transportation // Sustainability. 2020. V. 12. ID 7548. https://doi.org/10.3390/su12187548

[6] *Thomas C. E.* Fuel cell and battery electric vehicles compared // Int. J. Hydrogen Energy. 2009. V. 34. N 15. P. 6005–6020. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.003

[7] *Liu X., Reddi K., Elgowainy A., Lohse-Busch H., Wang M., Rustagi N.* Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. V. 45. P. 972–983. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.192

[8] *Стенина И. А., Сафронова Е. Ю., Левченко А. В., Добровольский Ю. А., Ярославцев А. Б.* Низкотемпературные топливные элементы: перспективы применения для систем аккумулирования энергии и материалы для их разработки (Обзор) // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 4–18. https://doi.org/10.1134/S0040363616060072

[9] *MacLean H. L., Lave L. B.* Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies // Progress Energy Combust. Sci. 2003. V. 29. P. 1–69. https://doi.org/10.1016/S0360-1285(02)00032-1

[10] *McKenzie E. C., Durango-Cohen P. L.* Environmental life-cycle assessment of transit buses with alternative fuel technology // Transportation Research. Part D. 2012. V. 17. P. 39–47. https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.09.008

[11] *Мазурова О. В.* Оценка сравнительной эффективности использования автомобильных топлив и электроэнергии для автомобильного транспорта // Экономика региона. 2019. Т. 15. Вып. 2. С. 493–505. https://doi.org/10.17059/2019-2-14

[12] *Sacchi R., Bauer C., Cox B. L.* Does Size Matter? The Influence of Size, Load Factor, Range Autonomy, and Application Type on the Life Cycle Assessment of Current and Future Medium- and Heavy-Duty Vehicles // Environ. Sci. Technol. 2021. V. 55. N 8. P. 5224–5235. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07773

[13] *Hawkins T. R., Singh B., Majeau-Bettez G., Strømman A. H.* Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles // J. Ind. Ecol. 2013. V. 17. N 1. P. 53–64. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x

[14] *Li T., Liu Z. C., Zhang, H. C. Jiang Q. H.* Environmental emissions and energy consumptions assessment of a diesel engine from the life cycle perspective // J. Clean. Prod. 2013. V. 53. P. 7–12. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.034

[15] *Луканин В. Н., Трофименко Ю. В.* Экологические воздействия автомобильных двигателей на окружающую среду // Итоги науки и техн. ВИНИТИ. Сер. Автомобильный и городской транспорт.1993. Т. 17. С. 1–136.

[16] *Корнилов Г. С.* Эколого-экономическая оценка автомобильных дизелей в полном жизненном цикле // Автотракторное электрооборудование. 2004. № 10. С. 27–32.

[17] *Звонов В. А., Козлов А. В., Кутенев В. Ф.* Экологическая безопасность автомобиля в полном жизненном цикле. М.: НАМИ, 2001. 248 с.

[18] *Потемкин Д. И., Усков С. И., Горлова А. М., Кириллов В. А., Шигаров А. Б., Брайко А. С., Рогожников В. Н., Снытников П. В., Печенкин А. А., Беляев В. Д., Пименов А. А., Собянин В. А.* Низкотемпературная паровая конверсия природного газа в метано-водородные смеси // Катализ в пром-сти. 2020. Т. 20. № 3. С. 184–189. https://doi.org/10.18412/1816-0387-2020-3-184-189

[19] *Макарян И. А., Седов И. В., Максимов А. Л.* Хранение водорода с использованием жидких органических носителей (обзор) // ЖПХ. 2020. Т. 93. № 12. С. 1716–1733. https://doi.org/10.31857/S0044461820120038 [*Makaryan I. A., Sedov I. V., Maksimov A. L.* Hydrogen storage using liquid organic carriers // Russ. J. Appl. Chem. 2020. V. 93. P. 1815–1830. https://doi.org/10.1134/S1070427220120034].

[20] *Liu Y., Lu S., Yan X., Gao S., Cui X., Cui Z.* Life cycle assessment of petroleum refining process: A case study in China // J. Clean. Prod. 2020. V. 256. ID 120422. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120422

[21] *Cetinkaya E., Dincer I., Naterer G. F.* Life cycle assessment of various hydrogen production methods // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37. P. 2071–2080. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.064

[22] *Salkuyeh Y. K., Saville B. A., MacLean H. L.* Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. P.18894–18909. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.219

[23] *Koroneos C., Dompros A., Roumbas G.* Hydrogen production via biomass gasification — A life cycle assessment approach // Chem. Eng. Processing: Process Intensification. 2008. V. 47. N 8. P. 1261–1268. https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.04.003

[24] *Mohr M., Peters J. F., Baumann M., Weil M.* Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes // J. Ind. Ecol. 2020. V. 24. P. 1310–1322. https://doi.org/10.1111/jiec.13021

[25] *Sovacool B. K.* Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey // Energy Policy. 2008. V. 36. P. 2950–2963. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.017

[26] *Sanchez J. A. G., Martinez J. M. L., Martin J. L., Holgado M. N. F., Morales H. A.* Impact of Spanish electricity mix, over the period 2008–2030, on the life cycle energy consumption and GHG emissions of electric, hybrid diesel-electric, fuel cell hybrid

and diesel bus of the Madrid transportation system // Energy Conversion and Management. 2013. V. 74. P. 332–343. http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.023

[27] *Burchart-Korol D., Jursova S., Folega P., Korol J., Pustejovska P., Blaut A.* Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic // J. Clean. Prod. 2018. V. 202. P. 476–487. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.145

[28] *Ahmadi P., Kjeang E.* Comparative life cycle assessment of hydrogen fuel cell passenger vehicles in different Canadian Provinces // Int. J. Hydrogen Energy. 2015. V. 40. P. 12905–12917. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.147

[29] *Ren L., Zhou S., Ou X.* Life-cycle energy consumption and greenhouse-gas emissions of hydrogen supply chains for fuel-cell vehicles in China // Energy. 2020. V. 209. ID 118482. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118482

[30] *Lee D.-Y., Elgowainy A., Vijayagopal R.* Well-to-wheel environmental implications of fuel economy targets for hydrogen fuel cell electric buses in the United States // Energy Policy. 2019. V. 128. P. 565–583. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.021

[31] *Correa G., Munoz P. M., Rodriguez C. R.* A comparative energy and environmental analysis of a diesel, hybrid, hydrogen and electric urban bus // Energy. 2019. V. 187. ID 115906. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115906

[32] *Rosen M. A.* Advances in hydrogen production by thermochemical water decomposition: A review // Energy. 2010. V. 35. N 2. P. 1068–1076. https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.018

[33] *Lombardi L., Tribioli L., Cozzolino R., Bella G.* Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA // Int. J. Life Cycle Assess. 2017. V. 22. P. 1989–2006. https://doi.org/10.1007/s11367-017-1294-y

[34] *Whittingham M. S.* Lithium batteries and cathode materials // Chem. Rev. 2004. V. 104. P. 4271–4301. https://doi.org/10.1021/cr020731c

[35] *Li M., Lu J., Chen Z., Amine K.* 30 Years of lithium-ion batteries // Adv. Mater. 2018. V. 30. ID 1800561. https://doi.org/10.1002/adma.201800561

[36] *Kim T., Song W., Son D.-Y., Ono L. K., Qi Y.* Lithium-ion batteries: Outlook on present, future, and hybridized technologies // J. Mater. Chem. A. 2019. V. 7. P. 2942–2964. https://doi.org/10.1039/c8ta10513h

[37] *Ярославцев А. Б., Кулова Т. Л., Скундин А. М.* Электродные наноматериалы для литий-ионных аккумуляторов // Успехи химии. 2015. Т. 84. № 8. С. 826–852. http://dx.doi.org/10.1070/RCR4497 [*Yaroslavtsev A. B., Kulova T. L., Skundin A. M.* Electrode nanomaterials for lithium-ion batteries // Russ. Chem. Rev. 2015. V. 84. N 8. P. 826–852. http://dx.doi.org/10.1070/RCR4497].

[38] *Ding Y., Cano Z. P., Yu A., Lu J., Chen Z.* Automotive Li-Ion batteries: Current status and future perspectives // Electrochem. Energy Rev. 2019. V. 2. P. 1–28. https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z

[39] *Zhang X., Peng H., Wang H., Ouyang M.* Hybrid lithium iron phosphate battery and lithium titanate battery systems for electric buses // IEEE Transactions Vehicular Technol. 2018. V. 67. N 2. P. 956–965. https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2749882

[40] *Yi T.-F., Xie Y., Zhu Y.-R., Zhu R.-S., Shen H.* Structural and thermodynamic stability of $Li_4Ti_5O_{12}$ anode material for lithium-ion battery // J. Power Sources. 2013. V. 222. P. 448–454. http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.09.020

[41] *Belharouak I., Sun Y.-K., Lu W., Amine K.* On the safety of the $Li_4Ti_5O_{12}/LiMn_2O_4$ lithium-ion battery system // J. Electrochem. Soc. 2007. V. 154. N 12. P. A1083–A1087.

[42] *Wolff S., Seidenfus M., Gordon K., Alvarez S., Kalt S., Lienkamp M.* Scalable life-cycle inventory for heavy-duty vehicle production // Sustainability. 2020. V. 12 (13). ID 5396. https://doi.org/10.3390/su12135396

[43] *Zhou B., Wu Y., Zhou B., Wang R., Ke W., Zhang S., Hao J.* Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions // Energy. 2016. V. 96. P. 603–613. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041

[44] *Faria R., Marques P., Moura P., Freire F., Delgado J., de Almeida A. T.* Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles // Renewable Sustainable Energy Rev. 2013. V. 24. P. 271–287. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.063

[45] *Dunn J. B., Gaines L., Kelly J. C., James C., Gallagher K. G.* The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction // Energy Environ. Sci. 2015. V. 8. P. 158–168. https://doi.org/10.1039/C4EE03029J

[46] *Zackrissona M., Avellan L., Orlenius J.* Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electricvehicles — Critical issues // J. Clean. Prod. 2010. V. 18. N 15. P. 1517–1527. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.004

[47] *Golroudbary S., Calisaya-Azpilcueta D., Kraslawski A.* The life cycle of energy consumption and greenhouse gas emissions from critical minerals recycling: Case of lithium-ion batteries // Procedia CIRP. 2019. V. 80. P. 316–321. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.003

[48] *Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E., Weidema B*. The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology // Int. J. Life Cycle Assess. 2016. V. 21. P. 1218–1230. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8

[49] *Ahmed S., Nelson P. A., Gallagher K. G., Susarla N., Dees D. W*. Cost and energy demand of producing nickel manganese cobalt cathode material for lithium ion batteries // J. Power Sources. 2017. V. 342. P. 733–740. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.069

[50] *Wolff S., Fries M., Lienkamp M.* Technoecological analysis of energy carriers for long–haul transportation // J. Ind. Ecol. 2019. V. 24. N 1. P. 165–177. https://doi.org/10.1111/jiec.12937

[51] *Barbir F., Basile A., Veziroglu T. N*. Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Enenrgy Conversion. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2015.

[52] *Landinger H*. International Perspectives for Fuel Cells for Materials Handling Vehicles (MHVs) // Proceedings of the 10th Int. Colloquium Fuels — Conventional and Future Energy for Automobiles. Stuttgart, Germany, 22 January 2015.

[53] *Mori M., Jensterle M., Mrzljak T., Drobnic B.* Life-cycle assessment of a hydrogen-based uninterruptible power supply system using renewable energy // Int. J. Life Cycle Assess. 2014. V. 19. P. 1810–1822. https://doi.org/10.1007/s11367-014-0790-6

[54] *Melideo D., Cebolla O. R., Ronnefeld W. E.* Life cycle assessment of hydrogen and fuel cell technologies, EUR 29986 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-13185-4 (online). JRC116599. https://doi.org/10.2760/434747 (online)

[55] *Franzitta V., Curto D., Milone D., Trapanese M.* Energy saving in public transport using renewable energy // Sustainability. 2017. V. 9. N 1. ID 106. https://doi.org/10.3390/su9010106

[56] *Usui T., Hondo H.* Life cycle CO_2 emission analysis of hydrogen storage and battery for Wind power generation // J. Jpn Inst. Energy. 2010. V. 89. P. 551–561.

[57] *Deliali A., Chhan D., Oliver J., Sayess R., Pollitt K. J. G., Christofa E*. Transitioning to zero-emission bus fleets: State of practice of implementations in the United States // Transport Rev. 2021. V. 41. N 2. P. 164–191. https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1800132

[58] *Shtang A. A., Yaroslavtsev M. V., Dedov S. I., Xiaogang W*. Comparison of energy consumption of different types of passenger public transport in Russian operational conditions. 20 Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. EDM 2019. Altai Republic, Erlagol, 2019. P. 705–710. https://doi.org/10.1109/EDM.2019.8823400

[59] *Basma H., Mansour C., Haddad M., Nemer M., Stabat P.* Comprehensive energy modeling methodology for battery electric Buses // Energy. 2020. V. 207. ID 118241. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241

[60] *Martins J., Miles J*. A techno-economic assessment of battery business models in the UK electricity market // Energy Policy. 2021. V. 148. ID 111938. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111938

[61] *Thompson S. T., James B. D., Huya-Kouadio J. M., Houchins C., DeSantis D. A., Ahluwalia R., Wilson A. R., Kleen G., Papageorgopoulos D*. Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and highvolume manufacturing description, validation, and outlook // J. Power Sources. 2018. V. 399. P. 304–313. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.100

Научное редактирование проведено научным редактором журнала «Нефтехимия» к.х.н. Н. В. Шелеминой.