

# Пути повышения энергоэффективности и экологической безопасности городского автотранспорта



**О. В. Белый,**  
д. т. н., профессор,  
директор по науке  
ФГБУН  
Санкт-Петербургский  
научный центр РАН  
(СПб НЦ РАН)



**Л. Д. Барина,**  
к. т. н., доцент,  
вед. научный  
сотрудник  
СПб НЦ РАН



**Л. Э. Забалканская,**  
к. физ.-мат. н.,  
доцент, вед. научный  
сотрудник СПб НЦ РАН

**Обеспечение экологически устойчивого развития городского автомобильного транспорта общего пользования входит в число приоритетных направлений Государственной программы по развитию транспортной отрасли РФ на 2018–2021 гг. Для решения этого вопроса необходимо использовать опыт, накопленный в зарубежных странах.**

Сегодня улично-дорожная сеть (УДС) большинства городов не справляется с растущими транспортными потоками, что приводит к затруднению движения. Это становится причиной увеличения объемов потребления моторного топлива, а значит, и объемов выбросов вредных веществ (ВВ) в атмосферу. Кроме того, повышается уровень шумового и вибрационного воздействия.

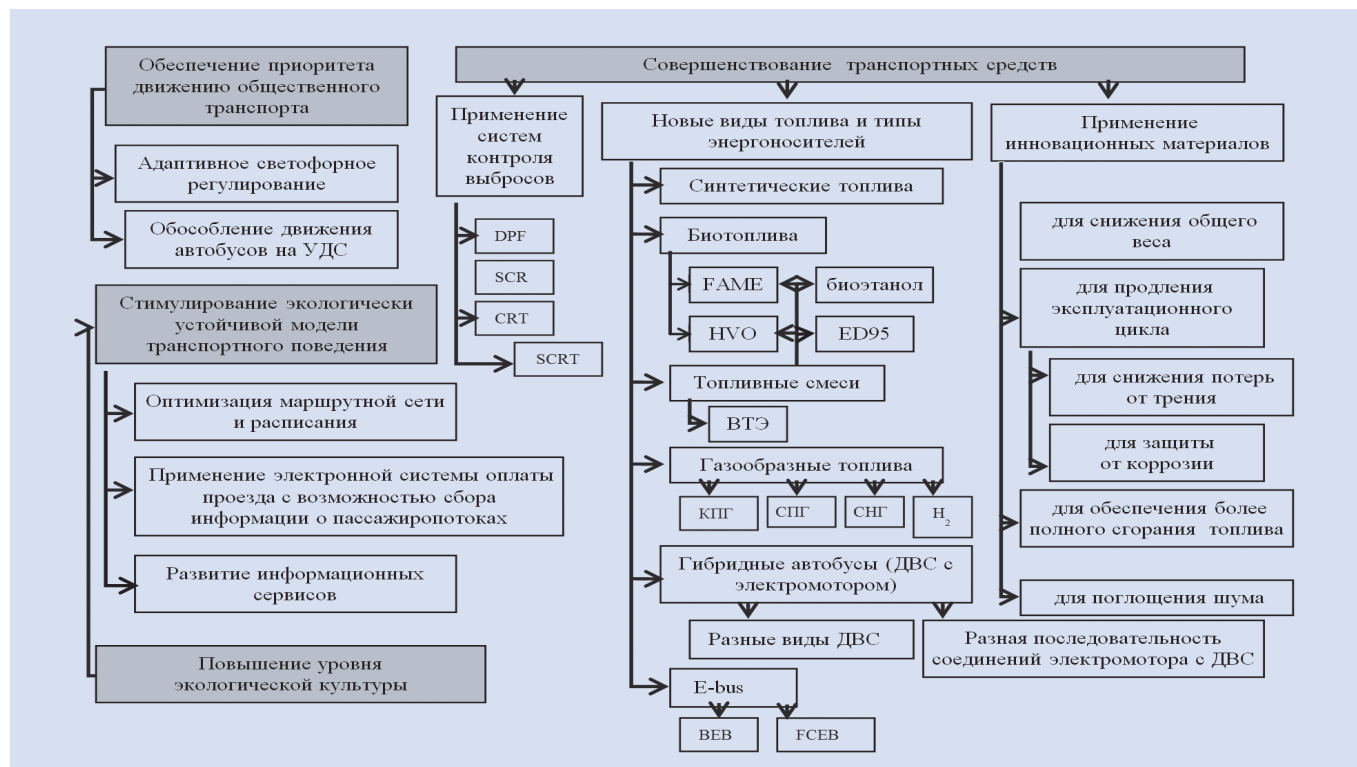
Известно, что уменьшение пробега личного автотранспорта по УДС возможно, когда обслуживание значительной части пассажиропотока берет на себя городской транспорт общего пользования. Перевозка пассажиров автобусами — приоритетная составляющая транспортной системы даже в тех городах, где задействован электротранспорт. Автобус рассматривается как наиболее гибкий вид общественного транспорта (ОТ), не требующий дополнительной инфраструктуры, способный перемещать значительные пассажиропотоки.

Наибольшие парки городских автобусов отмечаются в Китае — 17 %, Южной Корее — 12 %, США и России — по 6 %, Индонезии — 4 % от общего количества общественного транспорта [1]. Переключение более 10 % пассажиропотока с личного автотранспорта на автобус дает большой вклад в снижение объемов выбросов и увеличение эффективности использования ресурсов, в том числе и пространственных [2], чем совершенствование транспортных средств (ТС). Следовательно, важнейшая задача управления транспортным комплексом города — стимулирование использования ОТ. Для этого нужно обеспечить его пас-

сажиром преимущества перед теми, кто перемещается на личном автомобиле, т. е. необходима организация дорожного движения, предоставляющая право преимущественного проезда городскому транспорту общего пользования. Это выделение отдельных полос на УДС, адаптивное управление светофорами, позволяющее ОТ быстрее преодолевать перекрестки. Выделенные полосы существенно увеличивают скорость движения, способствуют его равномерности. Увеличение скорости ОТ привлечет дополнительный пассажиропоток, снизит потребление топлива и объемы вредных выбросов (ВВ), уровень шумового и вибрационного воздействия. На достижение этих целей направлен и приоритетный проезд перекрестков, но при движении автобусов в общем потоке требуется дополнительное оборудование для обеспечения взаимодействия ТС и светофорных объектов (удлинение на 5–10 с зеленого сигнала или укорочение красного). Средняя скорость движения может быть увеличена подобным образом на 10–30 % [2]. Основные пути обеспечения экологической безопасности и энергоэффективности городского автомобильного транспорта общего пользования приведены на схеме.

Доступность и удобство оплаты проезда в ОТ имеют большое значение для увеличения пассажиропотока. К тому же электронные средства оплаты проезда позволяют собирать информацию о пассажиропотоках, необходимую для планирования транспортного обслуживания населения.

Существенную роль в изменении модели транспортного поведения играет развитие информационных систем, что



дает пассажирам возможность планировать поездки с помощью ОТ, ориентироваться в мультимодальной транспортной системе и наблюдать в реальном времени за передвижением ТС на выбранном маршруте. Для этого используют личные интернет-сервисы, информационные табло на остановках ОТ и внутри ТС.

Поэтапное введение жесткого нормирования выбросов ВВ заставляет производителей автотранспорта совершенствовать ТС, топливные компании — переходить на производство более безопасных видов топлива, а транспортные предприятия — постоянно обновлять парк ТС. В 2013 г. 79 % европейских автобусов использовали дизельное топливо; 9,9 % — биодизель; 7 % — сжиженный природный газ (КПГ); 0,6 % — биогаз; 1,2 % — электричество; 2,3 % — другие энергоносители: биоэтанол, сжиженный нефтяной газ (СНГ) и водород.

Для снижения вредного воздействия городского автотранспорта общего пользования важно, чтобы новые виды топлива и топливных смесей обеспечивали уменьшение объемов выбросов ВВ и их токсичности, а усовершенствование ТС способствовало эффективному потреблению топлива и увеличению жизненного цикла различных элементов ТС. Кроме того, с позиций концепции устойчивого развития потребление невозобновляемых природных ресурсов следует ограничивать, заменяя их возобновляемыми и экономически целесообразными.

Негативное воздействие отработавших газов ТС, работающих на дизельном топливе, обусловлено значительными концентрациями  $SO_x$ ,  $NO_x$  и твердых дисперсных частиц (ТЧ). При использовании низкосернистого дизельного топлива (ultra low sulfur diesel, ULSD) выбросы  $SO_x$  значительно снижаются, особенно если двигатели обеспечивают высокую температуру сгорания топлива. Для снижения выбросов других веществ используют следующие системы очистки [2]:

- систему рециркуляции отработавших газов (exhaust gas recirculation, EGR) для более полного сжигания топлива, что ведет к уменьшению выбросов  $NO_x$  на 30–50 % без снижения эффективности работы двигателя;
- фильтр ТЧ (diesel particulate filter, DPF), уменьшающий при использовании низкосернистого топлива выбросы ТЧ до 72 %;
- каталитический нейтрализатор (selective catalytic reduction, SCR), позволяющий снизить выбросы  $NO_x$  на 65–95 %;
- высокоэффективный каталитический окислитель и фильтр ТЧ (continuously regenerating trap, CRT), снижающий выбросы ТЧ, CO и ЛОС до 90 %;
- SCRT (SCR+CRT).

Следует помнить, что в некоторых случаях применение систем очистки выбросов ведет к снижению энергоэффективности.

К модификациям дизельного топлива можно отнести водотопливные эмульсии (ВТЭ) с содержанием воды 5–30 %,

способствующие уменьшению выбросов ТЧ и сажи на 20–80 %, а выбросов  $NO_x$  на 10–30 %. Однако при использовании ВТЭ выявлена потеря мощности двигателя. Испытания проводили в Париже, использовали топливо Aquasol (85 % дизеля, 15 % воды и добавки для стабилизации смеси). При испытании старых автобусов и применении ВТЭ выбросы  $NO_x$  снизились на 30 %. Для новых автобусов на ULSD получены сравнимые результаты [2, 3].

В группу топливных смесей с дизелем входит биодизель, маркируемый буквой В и числом, означающим процентное содержание биотоплива (как правило, В20, но используются В7, В30 и даже В100). Добавление биотоплива, не содержащего соединений серы, существенно снижает выбросы  $SO_x$  и ароматических углеводородов, а также ТЧ10, но выбросы ТЧ2,5 могут повышаться. При использовании биодизеля снижается токсичность отработавших газов. Биодизель обладает смазывающими свойствами, что продлевает жизненный цикл ТС и увеличивает интервал между периодами технического обслуживания. Кроме того, при перевозке и хранении биодизеля не нужны спецемкости, а при аварийных разливах он разлагается быстрее дизеля. Однако биодизель агрессивен к резиновым деталям.

Использование В20 снижает выбросы ТЧ на 30 %, углеводородов на 50 %, однако значимое снижение выбросов  $NO_x$  достигается только при увеличении доли биокомпонентов и доработки топливной системы ТС или использования катализаторов. Максимальное снижение

отрицательного воздействия на окружающую среду биодизеля наблюдается при условии изготовления биокомпонентов из отходов пищевой промышленности или водорослей. Например, в Сен-Луисе (США) с 2001 г. 600 автобусов на B20 перевозят более 100 тыс. пассажиров ежедневно [4]. В Стокгольме (Швеция) более 400 автобусов работают на B100. Не все биокомпоненты дают ожидаемый результат. Так, в 2005 г. в Граце (Австрия) автобусы были переведены на B100, который производился из вторичного растительного масла. Производители B100 не смогли обеспечить надлежащее качество топлива, и в 2013 г. были закуплены новые автобусы стандарта EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicles) и EURO VI на обычном дизельном топливе [5].

Синтетическое (HVO) дизельное топливо, которое маркируется буквой «Н», также производится из растительного сырья (биотопливо второго поколения). В отличие от биодизеля топливо HVO способствует уменьшению выбросов оксидов азота [6]. Кроме того, синтетический биодизель H100 не требует технического переоборудования ТС, но его производство более энергоемко. При тестировании автобусов Scania на H100 в Финляндии, снижение выбросов ТЧ составило 30 %,  $\text{NO}_x$  — 10 % по сравнению с обычным дизелем [5].

В дизельных двигателях используется топливо на основе этанола, получаемого из растительного сырья лесной, целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности. Разрабатывается технология получения этанола из водорослей. При тестировании двигателей, работающих на этаноле, установлено снижение выбросов ТЧ на 50 % [6]. Шведская компания SERAB производит дизельное топливо ED95. Эффективность работы двигателя при использовании ED95 та же, что и для обычного дизеля, однако нет необходимости использовать фильтр ТЧ, что повышает энергоэффективность жизненного цикла ТС [7]. Компания Scania с 1989 г. начала производство автобусов на ED95. Сейчас выпущено третье поколение таких ТС. В то же время нельзя забывать, что этанол обладает большей коррозионной активностью и меньшей энергоемкостью, чем обычный дизель.

Более 25 млн ТС в мире работают на сжиженном углеводородном газе (СУГ). Использование СУГ существенно снижает выбросы ТЧ и  $\text{NO}_x$ , если ТС специально созданы для этого вида топлива [8]. Отметим, что СУГ может использоваться

при температуре до  $-45$  °С. Автобусы на СУГ эксплуатируются в городах Австрии, Дании, Нидерландов, Франции. Такие ТС оборудованы каталитическими нейтрализаторами, что снижает выбросы  $\text{NO}_x$  до 80 %. Стоимость новых автобусов и затраты на их обслуживание выше, чем обычных дизельных, но это компенсируется более низкой стоимостью топлива [2].

В Париже в рамках программы по переходу городского транспорта общего пользования на более «чистое» топливо проводили сравнительный анализ выбросов ВВ от ТС, работающих на дизельном топливе, на ULSD с фильтром ТЧ и на СУГ. Установлено, что выбросы ТС, работающих на СУГ, сравнимы с выбросами ТС на ULSD, при этом СУГ гораздо дешевле. В то же время существуют ограничения на использование ТС, работающего на СУГ, в тоннелях, а объемы выбросов некоторых углеводородных соединений (бензола, бутадиена и т. п.) существенно больше, чем при использовании дизеля и ULSD.

Наиболее распространенный альтернативный вид топлива для ТС – КПГ. Для двигателей, работающих на КПГ, характерен наиболее низкий уровень выбросов ТЧ (хотя размеры частиц меньше, что повышает их опасность для здоровья человека). Выбросы нерегулируемых загрязнителей – бензола и бутадиена – ниже при использовании КПГ по сравнению с СУГ, но выбросов ацетальдегида, формальдегида и метанола меньше в случае СУГ [6]. Перевод ТС на газовое топливо позволяет сократить выбросы углеводородов с высокой химической активностью, способствующих образованию приземного озона. При использовании КПГ выбросы ВВ менее зависят от условий движения ТС. Уровень выбросов  $\text{NO}_x$  существенно зависит от условий сгорания топлива. Кроме того, при использовании газового топлива детали двигателя ТС меньше подвержены коррозии, реже осуществляется замена масла [9]. Все эти факторы снижают затраты на обслуживание ТС и его отрицательное воздействие на окружающую среду в полном жизненном цикле. Энергоэффективность двигателей ТС, работающих на КПГ, на 30 % ниже, чем современного дизеля, поэтому их необходимо совершенствовать.

Многие города США (Бостон, Лос-Анджелес, Финикс, Даллас и др.) переводят свои автопарки на КПГ [10], в частности и ТС, функционирующие в транзитном режиме (bus rapid transit, BRT). Следует отметить, что BRT-системы за счет орга-

низации движения высокой интенсивности, создания особой инфраструктуры и автобусов повышенной вместимости обслуживают пассажиропотоки, сравнимые с пассажиропотоками на электро-транспорте, в том числе и в метрополитене [11, 12]. В Европе первым городом, приступившим к тестированию автобусов на КПГ в 1995 г., была Барселона [13]. Наибольший парк городских автобусов на КПГ (более 250) эксплуатируется в Анкаре.

При этом следует отметить, что оборудование для хранения КПГ вследствие значительной массы топлива должно быть прочным [9]. Увеличение массы ТС снижает его энергоэффективность и повышает уровень выбросов при движении, особенно в «городском» цикле. Применение же инновационных материалов, имеющих меньшую массу при аналогичных прочностных характеристиках, значительно повышает стоимость ТС.

В будущем КПГ — невозобновляемый ресурс может быть заменен биогазом, производимым из органических отходов. Наибольшее содержание метана отмечается в биогазе, полученном из отходов лесной промышленности [14]. Биогаз как топливо для городских автобусов использовался в Стокгольме (в 2003 г. более 400 автобусов) и в Реддинге (Великобритания), где 35 автобусов функционируют на биогазе из отходов сельского хозяйства [5].

Природный газ и биогаз могут использоваться как сырье для производства синтетических видов топлива, например, диметилэфира (ДМЭ). При использовании ДМЭ в выбросах практически нет  $\text{SO}_x$  и существенно меньше твердых частиц (не нужен фильтр DPF), а при использовании EGR-технологии наблюдается и снижение выбросов  $\text{NO}_x$ . Применение ДМЭ не снижает энергоэффективности ТС, как в случае с КПГ. Однако в процессе производства данного вида топлива добавляются выбросы «климатических» газов и потребление энергии. Требуется доработка системы впрыска двигателя, работающего на ДМЭ. Кроме того, вследствие низкой вязкости ДМЭ нужно следить, чтобы не было его утечек в топливной системе автомобиля. Уровень шума ДМЭ-автобусов ниже, чем обычных дизельных, при сравнимой стоимости тех и других. В Швеции в рамках проекта biomass-to-DME разработана технология получения ДМЭ, существенно снижающая выбросы ВВ при производстве по сравнению с производством дизельного топлива [2]. 100 автобусов на ДМЭ обслуживали



в 2010 г. Всемирную выставку в Шанхае, а позже были переданы для обслуживания городских маршрутов.

Глобальное воздействие энергоносителей для транспорта на окружающую природную среду оценивается с помощью анализа жизненного цикла — WTW-анализа (Well-to-wheels, от скважины до колеса), когда учитывается потребление энергии на протяжении всего жизненного цикла энергоносителей и выбросов «климатических газов». При этом рассматриваются WTT-выбросы (well-to-tank, от скважины до бака) и TTW-выбросы (tank-to-wheels, выбросы отработавших газов).

Оказалось, что хотя TTW-выбросы для КПП ниже, выбросы по всему жизненному циклу для попутного нефтяного и природного газа сравнимы, так как у природного газа выше выбросы WTT [8]. Выбросы КПП и ДМЭ, полученного из КПП, сравнимы, поскольку более высокая энергоэффективность ДМЭ компенсирует выбросы и потребление энергии для его производства.

Наименьший WTW-выброс в CO<sub>2</sub>-эквиваленте демонстрируют ТС, работающие на биотопливе. Установлено, что выбросы WTT разных видов биотоплива существенно зависят от сырья. Например, этанол, производимый в Бразилии из сахарного тростника, оставляет существенно меньший «углеродный след», чем традиционное и газомоторное топливо, а этанол, полученный из зерновых культур, показывает меньшее снижение выбросов WTT. Виды биотоплива первого поколения обеспечивают снижение выбросов ВВ на 30–70 % [4, 15], а биотопливо второго поколения, производимое из непищевых компонентов и органической части бытовых

отходов, обеспечивает снижение WTT-выбросов ВВ на 85–95 %.

Повышение энергоэффективности и снижение выбросов ВВ, особенно в городском цикле, обеспечивается применением технологий гибридизации ТС (использование двигателей разного типа). В основном это касается автобусов, оснащенных двигателем внутреннего сгорания (ДВС) и электромотором. Наиболее распространены дизель-электрические автобусы, однако существуют и гибриды КПП и СПГ (в Китае). Электродвигатель эффективнее ДВС. Кроме того, суперконденсаторы или аккумуляторные батареи обеспечивают возможность рекуперативного торможения ТС, что особенно важно при движении в плотном потоке. Даже использование небольшого аккумулятора для накопления энергии торможения позволяет экономить 7–8 % топлива. Однако дополнительное оборудование, особенно аккумуляторная батарея, существенно повышает массу ТС, что снижает его энергоэффективность. Еще «чище» выбросы ТС, заряжаемых от электросети (гибридов plug-in), которые могут проходить на электромоторе до 30 км.

По результатам тестирования газовых, гибридных и дизельных автобусов установлено, что выбросы ТЧ гибридов и автобусов на КПП сравнимы и существенно меньше, чем выбросы дизельных автобусов, даже работающих на ULSD. Выбросы неметановых углеводородов выше у газовых автобусов [2]. Гибриды составляют значительную часть (20 %) автобусного парка Лондона, Нью-Йорка (30 %), Сан-Пауло, Рио-де-Жанейро, Богота, Сантьяго-де-Чили. В Лондоне энергоэффективность дизель-гибрида оказалась на 35–45 % выше чем дизеля,

в Нью-Йорке — на 20–30 %, в городах Латинской Америки — на 15–35 %.

Гибридным автобусам с использованием СПГ, передвигающимся по улицам Барселоны, нужно на 30 % меньше топлива, чем аналогичным автобусам, не оснащенным электромоторами. На пригородных маршрутах Стокгольма зафиксировано пятнадцатипроцентное снижение потребления топлива гибридными автобусами на этаноле, при движении в городе экономия топлива должна быть более существенной [5].

Лидерами в использовании гибридных ТС на автобусных маршрутах выступают города Китая. Например, в четырехмиллионном Чжэнчжоу электрогибриды: дизель-электрические, КПП- и СПГ-электрические ТС, составляют больше половины парка. С помощью гибридизации можно увеличить энергоэффективность автобуса на КПП на 19 %; 18-метрового дизельного автобуса — на 34; 12-метрового — на 26 % [1]. Выбросы TTW дизель-гибридом снижаются на 26 %, КПП-гибридом — на 19 %, КПП-гибридом plug-in — на 31 %.

Основные преимущества ТС BEV (battery-electric vehicle) — «ноль»-выброс (не происходит загрязнения городской среды отработавшими газами в процессе движения) и более низкий уровень шумового и вибрационного воздействия. Такие ТС входят в число наиболее перспективных для пассажирских перевозок в крупных городах.

С 2011 г. на маршрутах г. Шэнчжэнь (население 11,9 млн человек) функционируют 12-метровые автобусы BEV, число которых сегодня достигает 14 тысяч. Создание инфраструктуры для электро транспорта субсидируется правительством. На зарядных станциях ТС полностью перезаряжаются за 2,5–3,0 ч.

При использовании электромотора объемы WTW-выбросов «климатических» газов зависят от первичного источника энергии. В Китае основным первичным источником электроэнергии служит уголь (наибольшие WTT-выбросы), и все-таки WTW-выбросы электромотора существенно ниже (на 29–40 %), чем обычного дизеля [16].

Стоит отметить, что используемые аккумуляторные батареи необходимо заменять через 8–12 лет [1]. Проблема снижения воздействия на окружающую среду при производстве и утилизации аккумуляторов требует специальных исследований. Стоимость таких автобусов достаточно высока (прогнозируется ее снижение в следующем десятилетии), но обслуживание менее затратно.

Количество таких автобусов BEV и их доля в мировом парке ТС за последнее время существенно увеличились. Если с 2014 по 2016 г. весь парк автобусов вырос на 1,9 %, то автобусов с электродвигателем стало больше в 10 раз [17].

В группу ТС с «ноль»-выбросом входят и автобусы на топливных элементах (Fuel Cell Electric Buses, FCEB). В этом случае для выработки электрического тока в электрохимическом двигателе используется водород. Подобное ТС заряжается значительно быстрее обычного электромобиля, и расстояние, проходимое после заправки, как правило у них больше (до 400 км). Отпадают вопросы утилизации аккумуляторов, так как топливные элементы подвергаются рециклингу. Однако возникают серьезные проблемы, связанные с получением, транспортировкой и хранением водорода. Из соображений безопасности FCEB запрещено использовать в длинных тоннелях. Для перевозки и хранения водорода необходимы особо прочные емкости. Это определяет высокую себестоимость FCEB, в которых баки для топлива изготовлены из новейших высокопрочных материалов. Высокая стоимость FCEB (примерно в 4 раза выше стоимости дизельных ТС) становится серьезным препятствием для их широкого использования. В ближайшие годы ожидается значительное снижение стоимости таких ТС. Топливная экономичность (мили на галлон топлива в дизель-эквиваленте) FCEB в 1,4 раза выше, чем дизелей, и в 1,9 раз выше, чем автобусов на КПГ.

Объем WTW-выбросов «климатических» газов и энергоэффективность FCEB зависят от источника получения водорода. В настоящее время водород получают главным образом из природного газа, поэтому по указанным параметрам FCEB уступают дизельным ТС и автобусам на КПГ. Однако если водород получен как побочный продукт химической промышленности или электролизом воды в ночное время, уровень WTW-выбросов и потребление энергии существенно снижаются. В Осло городские автобусы потребляют водород, полученный только из возобновляемых источников, в частности, из биогаза. Реализуется программа по переводу автобусов на более экологически приемлемые виды энергии: до 2025 г. треть автобусов должна стать FCEB [18].

На горнолыжном курорте Уислер (Канада) 87 % автобусов — FCEB, водород для них получают на гидроэлектростанции и доставляют в жидком виде из Квебека. С 2017 г. Евросоюз реализует проекты

JIVE (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe) и JIVE 2. Цель проектов — коммерциализация использования FCEB за счет создания инфраструктуры для 10–30 автобусов в 22 европейских городах. К 2020 г. в Европе городские маршруты будут обслуживать не менее 300 FCEB [19]. А в Китае реализация проекта (Hydrogen Economy Pilot in Rugao) позволит к 2020 г. создать инфраструктуру для введения в действие 41 FCEB. Олимпийские игры 2022 г. будут обслуживаться автобусами на топливных элементах [20].

Повысить эффективность потребления энергоносителей, а значит, и уменьшить объем выбросов (прежде всего, WTW) помогут инновационные материалы. Напомним, что важно рассматривать весь их жизненный цикл, с учетом выбросов при производстве и утилизации и необходимых затрат энергии. Экономическая эффективность определяется доступностью материалов, в частности, возможностью наладить их производство.

Согласно оценкам, приведенным в презентации программы (Technology Collaboration Programmes/ Implementing Agreement on Advanced Materials for Transportation, TCP/IA — AMT) Всемирного энергетического агентства (IEA) за 2017 г., потенциал увеличения энергоэффективности при снижении массы ТС составляет 30 %, при использовании новых материалов в двигателе — 25 %, материалов для снижения трения — 5–7 % [21].

Для автотранспорта с «ноль»-выбросом WTW-выброс и энергоэффективность совершенствование новых автобусов связано с использованием современных материалов, обеспечивающих снижение массы ТС без потери прочности. Это алюминий, титан, высокопрочная сталь и сплавы, а также углепластики и нанокompозитные полимеры. Углепластики применяются для изготовления передаточных узлов механизмов трансмиссии и деталей двигателей. Сегодня этот материал очень дорогой, но он в пять раз легче стали и в 1,8 раз легче алюминия, а по прочности намного превосходит эти материалы. Для различных деталей кузовов и других узлов ТС используются и стеклопластики, органоластики, базальтопластики и боропластики.

В качестве примера использования композитных материалов для изготовления кузова ТС рассмотрим электробус Modulo C68E. Применение композитных материалов позволило снизить массу автобуса и уменьшить его длину при той же

пассажировместимости. Электробус не только энергоэффективный, но и весьма маневренный, его можно использовать на самых разных маршрутах (меньше ограничения на радиус поворота). С 2016 г. эти ТС используются в регулярных перевозках на УДС Будапешта, а с сентября 2017 г. проходят тестовые испытания в Москве [22].

В мировой практике при изготовлении кузовов ТС используют органоластики на основе армидных волокон, характеризующихся не только высокой прочностью и упругостью, но и повышенной пожаростойкостью. Они плохо горят и выделяют мало дыма, т. е. обеспечивают высокий уровень безопасности пассажиров. А металлоорганопластики — алоры отличаются к тому же высокой трещиностойкостью и демпфирующими свойствами, что позволяет снизить вибрационные нагрузки на водителей и пассажиров [23].

Кроме того, для снижения массы ТС применяют магниевые сплавы при изготовлении элементов двигателя и подвески, в двигателях также используют и керамические материалы. Вследствие их высокой термостойкости рабочую температуру в цилиндрах можно поднимать до 1600 °С, что обеспечивает более полное сгорание топлива. В дизельных адиабатических поршневых двигателях используется керамика на основе диоксида циркония и нитрида кремния, что дает возможность повысить коэффициент полноты сгорания топлива на 35–50 % и снизить массу двигателя на 30 % [24]. Планируются исследования по обеспечению стойкости керамики к термическим ударам и соединению керамических деталей с металлическими и пластмассовыми [25].

Для снижения потерь энергии вследствие трения узлов ТС применяют спецпокрытия: карбоновые (Diamond-like Carbon, DLC), нанокристаллические и т. п., и смазочные материалы низкой вязкости. Это способствует экономии энергоресурсов и удлинению жизненного цикла деталей, а значит, и снижению издержек на обслуживание ТС.

Кроме того, снижению издержек на обслуживание автобусов способствуют антикоррозионные покрытия (актуально для городов, где зимой применяют антигололедные средства), которым присущи и другие полезные свойства. Например, такие покрытия способствуют шумопоглощению, что обеспечивает больший комфорт водителям и пассажирам ТС. Антикоррозионные покрытия производят

на основе различных композитных материалов, в том числе и гибридных (органосиликатных), способных выдерживать воздействие агрессивных сред в различных диапазонах температуры [26].

Таким образом, использование новых материалов для создания и сервисного обслуживания автобусов позволяет не только экономить энергоресурсы в процессе движения, но и уменьшать воздействие на окружающую природную среду в полном жизненном цикле, а также снижать издержки при обслуживании городских автобусов [27, 28]. Приведенные в статье данные по перспективным направлениям дальнейшего развития современного общественного транспорта говорят о том, что повышение энергоэффективности, комфорта и экологичности транспортных средств возможно только на основе применения комплексного подхода. ■

#### Литература:

- Jürg Grütter, Real World Performance of Hybrid and Electric Buses. – URL: [http://www.repic.ch/files/7114/4126/7442/Grutter\\_FinalReport\\_e\\_web.pdf](http://www.repic.ch/files/7114/4126/7442/Grutter_FinalReport_e_web.pdf) (дата обращения 27.03.2018).
- Bus systems for the future. Achieving Sustainable Transport Worldwide. – URL: <https://east.unep.ch/assets/publications/Local-sustainable-transport-policies/bus-systems-for-the-future-achieving-sustainable-transport-worldwide.pdf> (дата обращения 20.03.2018).
- URL: <https://www.dieselnet.com/news/2002/10lubrizol.php> (дата обращения 21.03.2018).
- Alternative Fuels in Public Transit: A Match Made on the Road/ – URL: [www.afdc.energy.gov/pdfs/public\\_transit.pdf](http://www.afdc.energy.gov/pdfs/public_transit.pdf), (дата обращения 21.03.2018).
- Clean Buses – Experience with Fuel and Technology Options/ – URL: [http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/Clean\\_Buses\\_-\\_Experiences\\_with\\_Fuel\\_and\\_Technology\\_Options\\_2.1.pdf](http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/Clean_Buses_-_Experiences_with_Fuel_and_Technology_Options_2.1.pdf) (дата обращения 28.03.2018).
- Nylund N.-O., Koponen K. Fuel and Technology Alternatives for Buses. Overall Energy Efficiency and Emission Performance/ – URL: [http://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF\\_Annex\\_37.pdf](http://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Annex_37.pdf) (дата обращения 27.09.2017).
- ED95 – the green biofuel for heavy transport – URL: <http://www.sekab.com/biofuel/ed95> (дата обращения 4.04.2018).
- Autogas Incentive Policies / A Country-by-Country Analysis of Why and How Governments Encourage Autogas and What Works / 2016 Update. – URL: [www.wlpga.org/wp-content/uploads/2016/09/Autogas-Incentive-Policies-2016.pdf](http://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2016/09/Autogas-Incentive-Policies-2016.pdf) (дата обращения 25.10.2017).
- Natural Gas Buses: Separating Myth from Fact. – URL: [www.nrel.gov/docs/fy00osti/28377.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy00osti/28377.pdf) (дата обращения 26.03.2018).
- Alternative Fuels in Public Transit: A Match Made on the Road. – URL: [https://www.afdc.energy.gov/pdfs/public\\_transit.pdf](https://www.afdc.energy.gov/pdfs/public_transit.pdf), (дата обращения 17.04.2018).
- Wright L., Fjellstrom K. Mass Transit Options. – URL: [http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A\\_Sourcebook/SB\\_3\\_Transit-Walking-and-Cycling/GIZ\\_SUTP\\_SB\\_3a\\_Mass-Transit-Options\\_EN.pdf](http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A_Sourcebook/SB_3_Transit-Walking-and-Cycling/GIZ_SUTP_SB_3a_Mass-Transit-Options_EN.pdf) (дата обращения 12.11.2017).
- Wright L. Training Course: Mass Transit. – URL: [http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/H\\_Training-Material/GIZ\\_SUTP\\_TM\\_Mass-Transit\\_EN.pdf](http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/H_Training-Material/GIZ_SUTP_TM_Mass-Transit_EN.pdf) (дата обращения 25.09.2017).
- Buses operating on compressed natural gas. – URL: <http://civitas.eu/measure/buses-operating-compressed-natural-gas> (дата обращения 27.03.2018).
- Boisen P., Lage M. Fact Sheet: NG/ biomethane used as vehicle fuel. – URL: <http://www.ngva.eu/downloads/fact-sheets/NG-Biomethane-as-a-vehicle-fuel.pdf> (дата обращения 15.10.2017).
- The impact of biofuels on transport and the environment, and their connection with agricultural development in Europe. – URL: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/513991/IPOL\\_STU%282015%29513991\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/513991/IPOL_STU%282015%29513991_EN.pdf) (дата обращения 16.10.2017).
- 100 % Electric Bus Fleet For Shenzhen (Population 11.9 Million) By End Of 2017. – URL: <https://cleantechnica.com/2017/11/12/100-electric-bus-fleet-shenzhen-pop-11-9-million-end-2017> (дата обращения 2.04.2018).
- Electric Buses: Worldwide Fleet Ten-Folded in the Last Two Years. – URL: [http://www.masstransitmag.com/press\\_release/12356479/electric-buses-worldwide-fleet-ten-folded-in-the-last-two-years-demand-from-asia-dominates-the-market](http://www.masstransitmag.com/press_release/12356479/electric-buses-worldwide-fleet-ten-folded-in-the-last-two-years-demand-from-asia-dominates-the-market) (дата обращения 3.04.2018).
- Clean Hydrogen In European Cities. – URL: <http://chic-project.eu> (дата обращения 5.04.2018).
- JOINT INITIATIVE FOR HYDROGEN VEHICLES ACROSS EUROPE 2JIVE 2. – URL: <http://www.fch.europa.eu/project/joint-initiative-hydrogen-vehicles-across-europe-2> (дата обращения 5.04.2018).
- Wang Ju. Overview of Fuel Cell Vehicle Development in China. – URL: [http://www.lbma.org.uk/assets/events/Conference%202017/S5\\_JW.pdf](http://www.lbma.org.uk/assets/events/Conference%202017/S5_JW.pdf) (дата обращения 5.04.2018).
- Gibbs J. IEA Technology Collaboration Programmes/ Implementing Agreement on Advanced Materials for Transportation TCP. – URL: [www.iea.org/media/workshops/2017/euwp\\_march/8.IAAMTEUWPpresentation3\\_20\\_2017\\_combined.pdf](http://www.iea.org/media/workshops/2017/euwp_march/8.IAAMTEUWPpresentation3_20_2017_combined.pdf) (дата обращения 16.04.2018).
- Композиционные материалы в автомобилестроении. – URL: <https://a-kt.ru/articles/kompozitsionnye-materialy-v-avtomobilestroenii> (дата обращения 21.02.2018).
- Рогов В. А., Шкарупа М. И., Веллис А. К. Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении // Вестн. РУДН. Сер. Инженер. исслед. 2012. № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-kompozitsionnyh-materialov-i-ih-rol-v-sovremennom-mashinostroenii> (дата обращения 10.04.2018).
- Разработка керамических двигателей в Японии. – URL: <http://nippon-history.ru/books/item/f00/s00/z0000004/st008.shtml> (дата обращения 10.04.2018).
- Свойства и применение керамических материалов // Украинская ассоциация сталесплавщиков. – URL: <http://uas.su/books/newmaterial/142/razdel142.php> (дата обращения 21.02.2018).
- Шилова О. А., Кручинина И. Ю., Раилкан А. И. и др. Инновационные разработки в области защитных покрытий // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2015. Т. 8. № 4. С. 72–75.
- Белый О. В., Барина Л. Д., Забалканская Л. Э. Проблемы и перспективы применения альтернативных источников энергии для автомобильного транспорта. // Транспорт: наука, техника, управления. М. ВИНТИ, 2018. № 3, с. 5–14.
- Белый О. В. Проблемы формирования и организации Транспортных потоков // СПб. Элмор, 2010. – 116 с.