

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Dự kiến công suất được huy động ngày 29.04.2023 (Предполагаемые генерирующие мощности, подлежащие мобилизации 29.04.2023). URL: <https://www.nldc.evn.vn/FullNewsg/200/Cong-suat-huy-dong/default.aspx>
- 2 Đường sắt tốc độ cao Bắc Nam được đề xuất thế nào? (Как предлагается высокоскоростная железная дорога Север-Юг?). URL : <https://vnexpress.net/duong-sat-toc-do-cao-bac-nam-duoc-de-xuat-the-nao-4533219.html>
- 3 Giới thiệu hệ thống điện Việt Nam (Введение в электрическую систему Вьетнама). URL: <https://www.nldc.evn.vn/newsg/6/1855/Gioi-thieu-he-thong-dien-Viet-Nam/default.aspx>
- 4 Lịch Sử Đường Sắt Việt Nam (История железной дороги Вьетнама). URL: <https://vr.com.vn/lich-su-phat-trien.html#:~:text=Tuy%20%E1%BA%BFn%20%C4%91%C6%B0%E1%BB%9Dng%20s%E1%BA%Aft%20%C4%91%E1%BA%A7u%20ti%C3%AAAn,so%20v%E1%BB%9Bi%20giai%20%C4%91o%E1%BA%A1n%20%C4%91%E1%BA%A7u>
- 5 Quyết định số 396/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ: Phê duyệt kế hoạch, chính sách, giải pháp và nguồn lực thực hiện Quy hoạch mạng lưới đường sắt thời kỳ 2021–2030, tầm nhìn đến năm 2050. (Решение № 396/QĐ-TTg Премьер-министра: Утверждение планов, политики, решений и ресурсов для реализации генерального плана сети железных дорог на период 2021–2030 годов с перспективой до 2050 года). URL: <https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=207760>
- 6 Vietnam – Power Generation, Transmission, and Distribution (Вьетнам – производство, передача и распределение электроэнергии). URL : <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/vietnam-power-generation-transmission-and-distribution>
- 7 Железные дороги Вьетнама. URL: <https://map-vietnam.ru/r1way>

УДК 656.35; 338.47

© 2024 А. Э. Юницкий, С. В. Артюшевский

**ПОВЫШЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

В статье рассмотрены причины и факторы роста спроса на электромобили. Сделан анализ экологичности транспортных средств (ТС) и эффективности использования энергии на этапах производства и эксплуатации транспортных комплексов. Проведено сравнение КПД применения электроэнергии, полученной из углеводородных видов топлива и прямого сжигания топлива, в ДВС автомобиля. Выделен и предложен главный вектор повышения энергоэффективности транспортных комплексов будущего – снижение энергопотребления ТС, т. е. повышение их удельной энергоэффективности при аналогичной транспортной работе. Выделены основные источники потерь энергии как в ТС, так и в транспортном комплексе в целом, предложены решения по минимизации энергозатрат и сформированы критерии и состав энергоэффективного комплекса. Проведено сравнение полученных критериев с рельсо-струнным транспортом uST.

*Ключевые слова:* электромобиль, энергозатраты, экологическое влияние, «чистая» энергетика, ДВС, энергоэффективность, рельсо-струнный транспорт, uST.

**Введение**

С каждым годом всё активнее происходит изменение предпочтений пользователей от классических автомобилей с ДВС к транспортным средствам, использующим в качестве источника энергии электричество. Причина этого – технический прогресс, развитие новых технологий, четвёртая технологическая (промышленная) революция, что значительно упрощает и удешевляет производство и эксплуатацию электромобилей. Важным фактором также является рост цен, доступность и ограниченность традиционного углеводородного топлива, общемировое ухудшение экологической обстановки, с которым связывают массовые выбросы CO<sub>2</sub> двигателями традиционных автомобилей. Эти причины стали одними из основных в части интенсивного развития рынка электромобилей.

Первый электромобиль был создан до появления автомобилей с двигателем внутреннего сгорания, ещё в 1834 г. Томасом Дэвенпортом. Несмотря на постоянные разработки и попытки сделать коммерчески успешный проект, широкое распространение электромобили получили только в XXI веке, когда стала расти цена на нефть (рисунок 1), а вместе с ней и влияние защитников глобальной экологии. Все цены на нефть на рисунке 1 подняты на 50 дол-

ларов с целью их приведения к одной базе сравнения с ценами на газ в первом квартале 2000 г. (аппроксимация кубическими сплайнами).

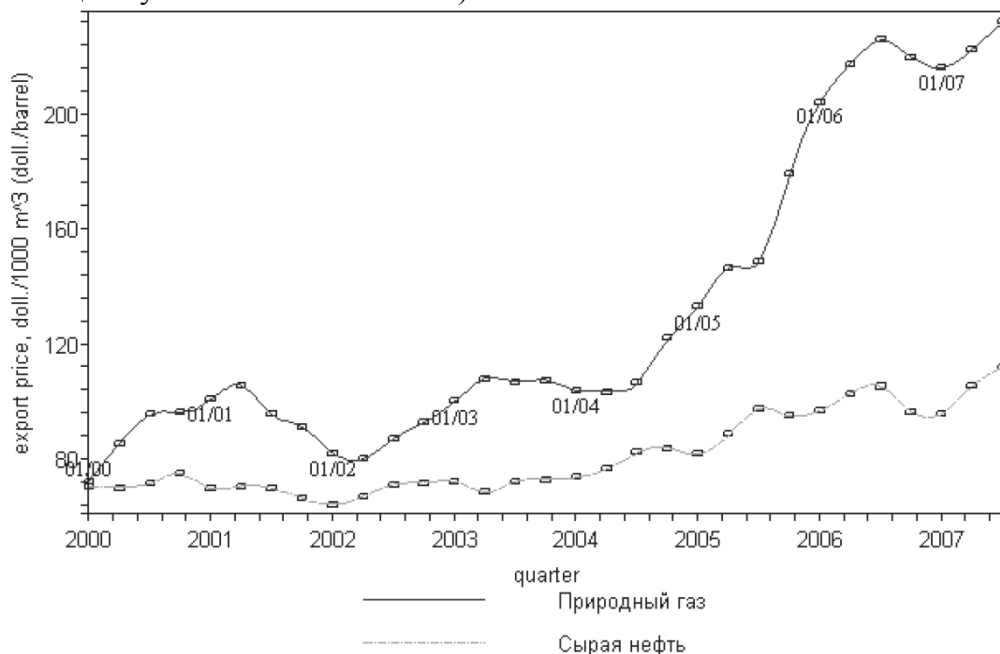


Рис. 1. Динамика средних экспортных цен на природный газ и сырую нефть с 1 квартала 2000 г. по 3 квартал 2007 г. [1]

Это дало толчок развитию технологий в данном направлении, и многие производители серийно выпустили ряд моделей с гибридными или полностью электрическими приводами. Самые популярные – это Tesla, Nissan Leaf, Renault Zoe, BMW i3, Volkswagen eGolf, Geely и др. Количество проданных электромобилей во всех регионах мира растёт с каждым годом. По данным IEA [2], в 2022 г. продано 10,2 млн электромобилей разных видов и конфигураций (что в 100 раз превышает продажи 2012 г.), из них 5,9 млн – на территории Китая, а 2,6 млн – в европейском регионе (кроме РФ и региона СНГ), 1 млн пришёлся на США, около 230 тыс. – на Южную Корею и Японию. Перечисленные страны составили 95 % всего рынка потребителей электротранспорта. По данным Rho Motion, в 2023 году было продано 13,6 млн электрических и гибридных автомобилей, что составило 15,8 % от общего мирового объёма продаж автомобилей, 85,9 млн штук – результаты получены при анализе отчётов ведущих аналитических компаний, таких как «LMC Automotive», «Jato», «Focus2move». Согласно прогнозам IEA и лидирующих автопроизводителей, к 2025 году 25 % проданных авто составят электромобили, а в 2030 г. цифра достигнет 41 %.

Несмотря на то, что США первыми запустили стандарт «электрификация автомобилей», до 2022 г. Европа значительно опережала по предпочтениям и государственным программам. Это связано с тем, что углеводородные энергоносители в европейском регионе не являются легкодоступными и цены на них значительно выше, чем в США. Особенно сильно это проявилось во время энергетического кризиса 2022 г. Также активно продвигается «экологически чистая» энергетика, значительно усиленная военно-политическими событиями в 2022 г., что привело к политике углеродной нейтральности, дискриминирующей транспорт с ДВС, включая такие крайности, как запрет на дизельные автомобили. Китай, в свою очередь, до 2022 г. делал акцент по льготам на автотранспорт, в то время как энергетическая отрасль и промышленность продолжают «копить».

В 2023 г. общемировой рынок электротранспорта подвергся серьёзным изменениям, вызванным геополитической и макроэкономической ситуацией. Эксперты Gartner привели в отчёте, опубликованном 9 марта 2023 г., доводы, что ценовой рост на электроэнергию в европейском регионе сделал менее выгодной эксплуатацию электротранспорта, а отдельные страны, такие как Швейцария, Великобритания и Австралия, вводят налог на электромобили. В то же время согласно отчёту института Center Automotive Research, было установлено, что

в результате замены ДВС на электропривод в Германии до 2030 г. будет потеряно около 125 тыс. рабочих мест – в отчёте указано, что для производства электромобилей достаточно 709 тыс. рабочих мест вместо существующих 834 тыс. При этом Китай остановил субсидирование таких машин с начала 2023 г. Увеличение стоимости сырьевой базы, особенно лития и никеля, вносит своё отрицательное влияние на отрасль. Также необходимо отметить проблемы со слаборазвитой сетью зарядных станций и низким качеством техобслуживания электромобилей. Всё это привело к увеличению стоимости электромобилей и повысило эксплуатационные затраты на их содержание.

Вышеперечисленные экономические и социально-политические проблемы снижают привлекательность электромобилей, ставя под сомнение экологичность и перспективность применения электроэнергии как топлива в транспортной отрасли при существующих технологиях и жизненном цикле автомобиля. В исследовании предлагается сделать анализ экологичности всех типов транспортных средств и эффективности использования энергии на этапах производства и эксплуатации транспортных комплексов, а также обозначить и предложить главный вектор повышения энергоэффективности транспорта будущего.

### **Анализ экологичности ТС и эффективности использования энергии на этапах производства и эксплуатации транспортных комплексов**

Перед конструкторами-разработчиками новых транспортных комплексов (в том числе электромобильных) в первую очередь стоит задача снижения пагубного воздействия на окружающую среду и повышению эффективности использования энергии, полученной из возобновляемых источников. При этом из-за отсутствия комплексной и объективной оценки воздействия энергетических и материальных ресурсов на окружающую среду, экологичность электрического транспорта остаётся весьма спорной. Связано это с тем, что необходимо оценивать не только конечные выбросы загрязняющих веществ транспортом в процессе эксплуатации (а это не только выхлопные газы), а и объёмы потерь и загрязнений на каждом этапе жизненного цикла электромобиля как продукта, а также – при производстве электрической энергии, начиная от первичного источника энергии (солнце, ветер, ископаемые энергоносители, радиоактивные элементы и др.) до доставки этой энергии к двигателю электромобиля.

Кроме того, необходимо также учитывать ресурсы и энергозатраты при строительстве и эксплуатации путей сообщения – электромобили движутся по дорогам, которые уже «закатали в асфальт» и «похоронили под шпалами» огромную территорию. Автомобильные и железные дороги изымают почву из земной биосферы в таком большом количестве, что она недополучает ежегодно более миллиарда тонн кислорода, так как под асфальтом и шпалами нет растительности, фотосинтез которой является поставщиком кислорода в атмосферу планеты. Согласно исследованиям [3], протяжённость автомобильных дорог общего назначения составляет 21,6 млн км, что вместе с железными дорогами протяжённостью 1,014 млн км [4], занимают площадь более 300 тыс. км<sup>2</sup>. Необходимо также отметить, что интенсивная эксплуатация электромобилей загрязняет почву, воду и воздух не выхлопными газами, а не менее опасными продуктами истирания шин и асфальта, а также антиобледенительными солями.

На этапе производства показательны исследования и аналитика агентства по охране окружающей среды Ricardo – в своём отчёте они указали, что во время производства одного автомобиля с ДВС в среднем выбрасывается 5,6 тонн эквивалента CO<sub>2</sub> в атмосферу. Для аналогичного электромобиля эта цифра составляет 8,8 тонн, основная часть которой получается при производстве аккумуляторных батарей (АКБ), что больше на 57 %, чем у автомобиля с ДВС [5].

Для оценки затрат и потерь в процессе эксплуатации необходимо отметить, что в случае глобального перехода на электромобили (замена всех автомобилей с ДВС на электромобили) будет недостаточно «чистой» энергии, так как на конец 2023 года на дорогах всего мира числилось около 1,47 млрд автомобилей (согласно экспертам аналитического агентства «АВТОСТАТ», средняя мощность двигателя автомобилей равна 137,1 л.с. ≈ 100,8 кВт), суммарная мощность приводов 148 176 ГВт в пике. При условии одновременного использования 10 % ав-

томобилей потребляемая мощность приводов составит 14 817,6 ГВт. На конец 2022 года установленная мощность электростанций всего мира составила 8 364,1 ГВт (по данным The International Renewable Energy Agency (IRENA)), это составляет 56 % от требуемой. То есть, для обеспечения электроэнергией мирового автопарка электромобилей, с ограничением 10 % рабочего времени (не более 2,25 ч в сутки) необходимо увеличить количество и мощность всех электростанций в мире в 3 раза. Поэтому для обеспечения появится необходимость существенно увеличить производство электроэнергии на углеводородных электростанциях. Это автоматически приведёт к увеличению выбросов дымовых газов и CO<sub>2</sub>, а также дымовой пыли, сажи, золы и шлака в земную атмосферу, почву и воду, и ухудшение общего экологического состояния биосферы планеты.

Рассмотрим баланс производства электроэнергии в зависимости от вида топлива. На сегодняшний день около 65 % мировой электроэнергии производится из углеродного ископаемого сырья (уголь, газ, нефть и др.) [6], в свою очередь, около 58 % из них приходится на сжигание угля и природного газа на ТЭС. Несмотря на то, что с начала 2000-х гг. доля таких «зелёных» источников, как гелио- и ветроэнергетика в выработке электроэнергии выросла с 0,25 % до 12 %, доля электроэнергии, выработанной на АЭС (которую также относят к группе низкоуглеродных источников), упала с почти 17 до 9,15 %. Таким образом, произошло перераспределение внутри группы так называемых низкоуглеродных источников энергии. Необходимо упомянуть также выработку электроэнергии на гидроэлектростанциях – на её долю приходится порядка 15 % от мирового объёма выработки, но в последние годы наблюдается уход от ГЭС в пользу сохранения пахотных площадей.

Безусловно, доля низкоуглеродных источников выработки электроэнергии в мировом балансе за последние 20–25 лет выросла – можно привести в пример такие страны, как Швеция, Норвегия, Франция и Исландия, где 90 % и более электроэнергии производится по «зелёным» технологиям, но данные технологии по-прежнему остаются достаточно дорогими и не могут конкурировать со стоимостью электроэнергии, произведённой на ТЭС.

Определим эффективность полного цикла получения электроэнергии, то есть от источника до потребителя или «до электродвигателя».

Как было определено выше, большая часть электроэнергии производится в процессе сжигания угля и природного газа в энергетических котлах ТЭС. Рассмотрим коэффициент полезного действия ТЭС: в зависимости от вида топлива, КПД теплоэлектростанций варьируется от 32 % (при работе на угле) до 40 % (при работе на природном газе, без учёта блоков ПГУ) [7], он получен в результате совместной работы парового котла, турбины и генератора (рисунок 2). Для дальнейших расчётов, принимаем среднее значение – 36 %.

Далее, для транспортировки выработанной на ТЭС электроэнергии к потребителю используются электрические сети и трансформаторные подстанции, которые также имеют свои потери: средние потери на повышающей трансформаторной подстанции – 2 %, в магистральных электрических сетях – 4 %, на понижающих трансформаторных подстанциях – 2 %, в распределительных электрических сетях – 6 %.

Таким образом, эффективность «полного цикла» получения электроэнергии (от источника генерации до потребителя, т. е. до розетки зарядной станции) будет порядка 31 %.

Процесс заряда современных аккумуляторов имеет потери около 10 % (это довольно оптимистический показатель), следовательно, после зарядки аккумулятора, например электромобиля, мы имеем КПД «полного цикла» уже 28 %.

Для сравнения: общий КПД лучших бензиновых двигателей (с искровым принудительным зажиганием) 25–30 %, а КПД лучших дизельных моторов в их самых экономичных крупногабаритных вариантах достигает 40–45 % [8] (рисунок 3), что даже без учёта проблем с переработкой аккумуляторных батарей показывает реальную низкую эффективность использования углеводородного топлива от первоисточника ТЭС.

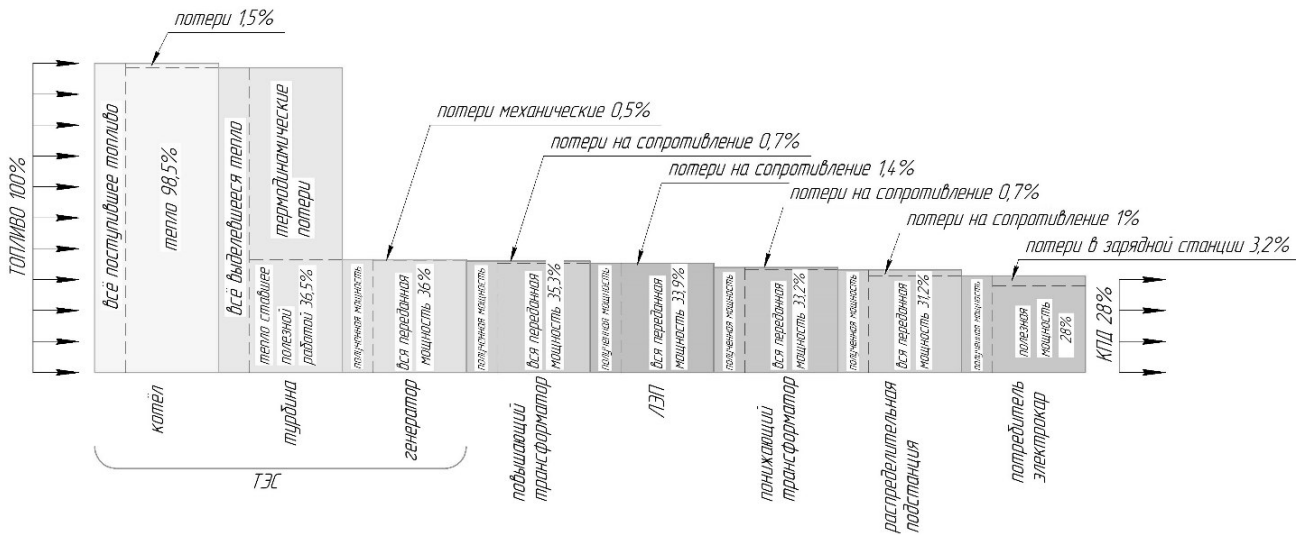


Рис. 2. Полный цикл получения электроэнергии для электромобиля (от источника генерации до потребителя)

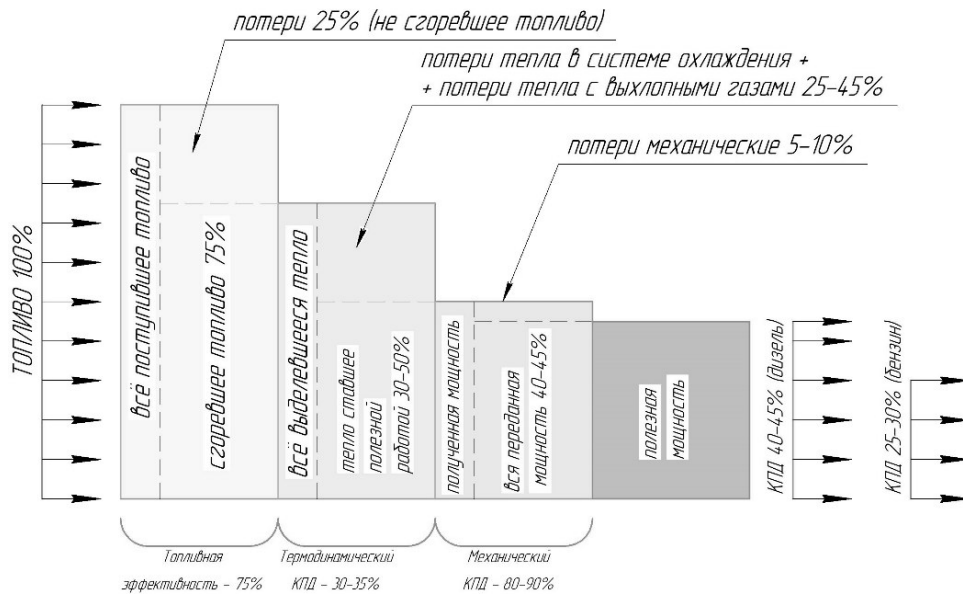


Рис. 3. Полный цикл получения энергии для автомобиля с ДВС

Анализ показывает, что потери энергии в электротранспорте с учётом всей цепочки, более высокие – в 1,6 раз выше (по первичной энергии) в сравнении с автомобилем с ДВС (дизельное исполнение). Энергоэффективность электромобиля ухудшает ещё и тот факт, что он вынужден постоянно возить с собой, в дополнение к полезному грузу, паразитную и очень тяжёлую тяговую аккумуляторную батарею (её масса достигает веса 7–8-и человек). Таким образом, «зелёная» энергетика, в которой ключевая роль отведена электромобилю как основному потребителю энергии, требует пересмотра и новых инновационных решений.

Главной задачей, стоящей перед разработчиками «чистого» транспорта, должен быть не столько переход на электроавтомобили, сколько снижение энергопотребления транспортными средствами, транспортными системами и транспортно-инфраструктурными комплексами в целом, причём в разы, а не на проценты, – до того приемлемого уровня, когда их энергообеспечение не будет вредить земной природе, независимо от того, как производится электрическая энергия – с помощью электростанций, работающих на углеводородном сырье или на альтернативных источниках энергии.

### Критерии энергоэффективности транспортных комплексов

Основными направлениями снижения энергопотребления, а, соответственно, увеличения эффективности транспорта, является, в первую очередь, уменьшение сопротивления движению. Энергия, образующаяся в результате работы привода, расходуется на обеспечение динамики разгона, преодоление сопротивления качению колёс, преодоление сил аэродинамического сопротивления, потери в редукторе, обеспечение работы внутренних потребителей транспортного модуля (климат–контроль и др.).

Энергоэффективность разгона зависит от массы самого транспортного средства и количества перевозимых пассажиров (груза). В этом ключе следует сосредоточиться на создании ТС с минимальной массой и большой пассажировместимостью (например, удельная материалоемкость пассажирского железнодорожного поезда, с учётом массы локомотива, – 1500–2000 кг/пасс., самолёта, с учётом массы топлива и экипажа, – 800–1200 кг/пасс., электромобиля, с учётом массы батареи и водителя, – 500–600 кг/пасс., легкового автомобиля, с учётом массы топлива и водителя, – 400–500 кг/пасс.). Также требуется обеспечить на транспортной линии равномерное распределение потребителей мощности, без концентрации большой подвижной мощности (например, мощность привода высокоскоростного поезда – порядка 20 000 кВт), что позволит существенно упростить контактную сеть и повысить КПД комплекса.

Энергия, требуемая на преодоление сопротивления качению колёс, является преобладающей на скоростях движения до 60 км/ч [9]. Традиционный транспорт, перемещающийся по асфальтированному покрытию на пневматических шинах, является не оптимальным с точки зрения расхода энергии, поскольку коэффициент трения качения шины по асфальту примерно в 5 раз выше, чем стального колеса по стальному рельсу, а на высоких скоростях – в 15–20 раз и более.

Для оценки энергетической эффективности качения стальных колёс, в сравнении с классическими конструкциями пневмоколёс, состоящими из упругой резино-металло-тканевой оболочки, установленной на обод диска, сравниваем энергозатраты на преодоление сопротивления качению колёс.

Ниже приведён расчёт мощности, затрачиваемой классическим электромобилем на преодоление силы сопротивления качению пневмоколёс.

Мощность сопротивления качению автомобиля  $P_{\text{тп}}$ , Вт определяется по формуле:

$$P_{\text{тп}} = g \cdot V \cdot f \cdot G, \quad (1)$$

где  $G$  – вес электромобиля, кг (принимая вес  $G=1940$  кг – самого распространённого электромобиля Tesla Model S);

$f$  – коэффициент сопротивления качению (коэффициент трения второго рода), зависящий от конструкции шины, давления в ней, её эксплуатационных свойств и от дороги:

$$f = f_{\text{к}} + f_{\text{кг}}, \quad (2)$$

где  $f_{\text{к}}$  – коэффициент сопротивления качению деформируемого колеса по недеформируемому полотну;

$f_{\text{кг}}$  – коэффициент сопротивления качению по мягкому грунту.

Принимаем допущение: качение деформируемого колеса происходит по твёрдой (недеформируемой) поверхности, в таком случае  $f_{\text{кг}} = 0$ .

На коэффициент сопротивления качению существенное влияние оказывает скорость автомобиля: с ростом сил инерции растёт деформация шины, а, следовательно, и потери на внутреннее трение:

$$f_{\text{к}} = f_0 \cdot (1 + A_f \cdot V), \quad (3)$$

где  $f_0$  – коэффициент сопротивления качению при малых скоростях, согласно [9]  $f_0 = 0,008 \dots 0,015$ , принимаем среднее значение  $f_0 = 0,0115$ ;

$A_f$  – коэффициент, учитывающий влияние скорости на сопротивление качению эластичного колеса по недеформируемой поверхности, согласно [9], для легковых автомобилей  $A_f = (5,1 \dots 6,5) \cdot 10^{-4}$ , принимаем среднее значение  $A_f = 5,8 \cdot 10^{-4}$ ;

$V$  – скорость, м/с. (принимаем  $V = 25$  м/с или 90 км/ч).

В результате расчёта получаем, что мощность, требуемая для преодоления сопротивления качению пневмоколёс на скорости 90 км/ч равна  $P_{пр} = 5,7$  кВт.

Расход топлива на сопротивление качению стального колеса по стальному рельсу находим через потребляемую мощность по указанной ранее формуле (1), где  $f_k$  – коэффициент трения качения стального колеса по стальному рельсу,  $f_k = 0,0024$  [10].

В результате расчёта получаем  $P_{fc} = 1,14$  кВт.

Исходя из формулы (1), на показатели энергоэффективности перевозок также влияет вес транспортного средства. В современных электромобилях более 25 % веса составляет аккумуляторная батарея (вес АКБ Tesla Model S – 540 кг, при общей массе 1940 кг), что приводит к тому, что четверть всей затрачиваемой энергии тратится на перевозку самой себя. Соответственно, замена бортовых систем накопления энергии на внешнюю контактную сеть снизит требуемую мощность для преодоления сопротивления качению стального колеса по стальному рельсу до показателя  $P_{fc} = 0,86$  кВт.

Мощность, затрачиваемая классическим электромобилем на преодоление силы сопротивления качению пневмоколёс, больше в 6,6 раз, чем в случае применения пары стальное колесо-стальной рельс с применением токосъёма. Отсюда следует вывод, что энергоэффективный транспорт ближайшего будущего должен иметь шасси на стальных колёсах и перемещаться по рельсовой структуре с контактной сетью.

При анализе конструктивных особенностей стальных колёс подвижного состава железнодорожного транспорта, по мнению авторов, выявлен ряд недостатков. Первый из них связан с тем, что они имеют коническую форму и жёстко зафиксированы на оси, при этом вращаются по фасонному рельсу. К такому решению пришли вынужденно, не найдя иного способа обеспечить курсовую устойчивость поезда. В результате состав, перемещаясь вдоль пути, совершает синусоидальные колебания (рисунок 4), приводящие к трению реборд колёс о рельсы и постоянному юзу и буксованию стальных колёс, а также интенсивному и неравномерному износу и колёс, и рельсов.

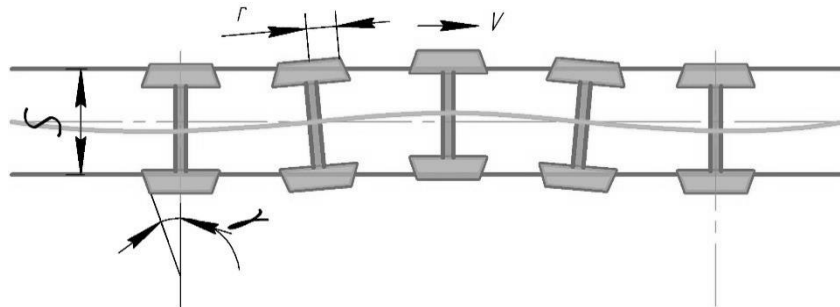


Рис. 4. Траектория движения колёсной пары

Следующий недостаток устоявшегося решения – точечный контакт колеса с рельсом. В результате в месте их соприкосновения возникает достаточно малое пятно контакта. Учитывая массу подвижного состава, напряжения в пятне контакта достигают показателей 600–1500 МПа (рисунок 5), что в несколько раз выше предела текучести материала. Устранить вышеописанные недостатки может цилиндрическое колесо и плоская головка рельса. В этом случае произойдёт трансформация пятна контакта от точки к линии. Соприкосновение по линии позволит увеличить площадь контакта колеса с рельсом, а значит, существенно снизить контактные напряжения, а поперечное расположение пятна контакта уменьшает угол переваливания, уменьшая силу сопротивления качению колеса. В совокупности с вводом электронной системы курсовой стабилизации, данное решение позволит избавиться и от реборд.

Для повышения энергоэффективности на скоростях выше 60 км/ч при проектировании транспортного средства, перемещающего пассажиров и грузы, следует уделять особое внимание аэродинамике. Серийные легковые автомобили имеют коэффициент  $C_x$  аэродинамического сопротивления формы в диапазоне 0,26–0,38 [12]. Данный показатель уже несколько десятилетий является статичным. На сегодняшний день проектируют концепт-кары с коэффициентом аэродинамичности формы, равным 0,175 [13], однако такие автомобили отличаются высокой стоимостью и требованием к качеству дорог. Без запуска в массовое производство приобретение таких автомобилей экономически нецелесообразно. Как бы ни оптимизировали и не сглаживали формы кузова дизайнеры, дальнейшее снижение коэффициента аэродинамичности практически невозможно, поскольку под каждым автомобилем, автобусом, поездом расположено дорожное полотно или рельсо-шпальная решётка, то есть – аэродинамический экран. Именно он препятствует снижению  $C_x$ , за счёт возникающего экранного эффекта, что существенно увеличивает мощность аэродинамического сопротивления, особенно при высоких скоростях движения.

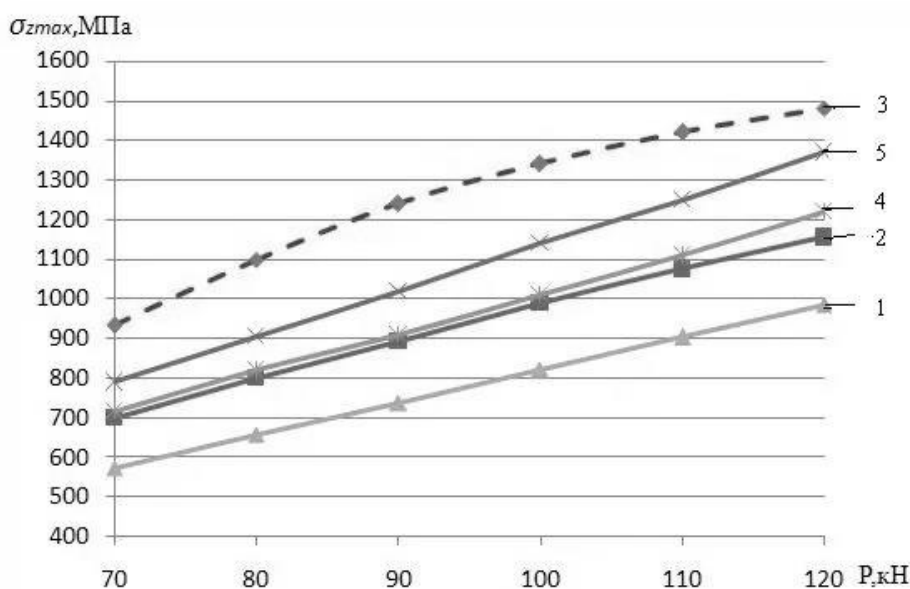


Рис. 5. Максимальные нормальные напряжения:

1 – оприработанный профиль колеса электровоза; 2 – новый профиль колеса электровоза; 3 – новый профиль колеса электровоза; 4 – приработанный профиль колеса вагона; 5 – новый профиль колеса вагона [11]

Для примера проведём аэродинамический расчёт электромобиля Tesla Model S с дорожным полотном и без него с описанием расчётной модели и граничных условий.

Модель представляет собой расчётную область, намного превышающую размеры автомобиля для исключения на границе области возмущения потока. Рассматривается 2 расчётных случая (с дорожным полотном и без него), отображённых на рисунке 6.

При моделировании использовался условно реверсивный метод расчёта – метод, при котором автомобиль неподвижен, а среда движется.

Граничные условия представляют собой:

- вход среды заданием скорости воздушного потока равной 25 м/с (90 км/ч);
- выход среды с давлением 101 325 Па;
- неподвижная стенка автомобиля с условием прилипания (нулевая скорость на поверхности стенки);
- условие симметрии на боковой и верхней границе расчётной области.

В качестве начальных условий принималось давление  $p = 101\,325$  Па и температура  $T = 20\text{ }^\circ\text{C} = 293,15$  К.



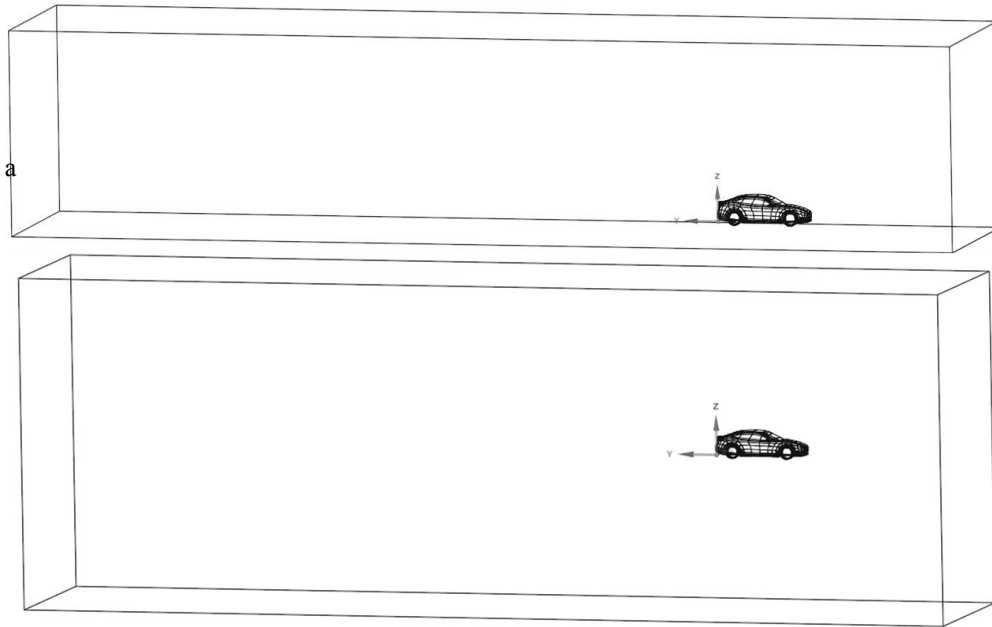


Рис. 6. Расчётная модель  
а – без дорожного полотна; б – с дорожным полотном

Методика расчёта заключается в следующем.

Для решения задачи выбрана модель турбулентности SST (Shear–Stress Transport)  $k-\omega$  model как более подходящая для решения задачи.

В качестве модели вязкой среды была выбрана модель идеального сжимаемого газа (4) с зависимостью вязкости от температуры по формуле Sutherland (5):

$$p = \rho \cdot R \cdot T, \quad (4)$$

где  $p$  – давление в объёме, Па;  
 $\rho$  – плотность среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К)  
 $T$  – температура среды, К,

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \cdot \frac{T_0 + S_\mu}{T + S_\mu}, \quad (5)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость среды, Па·с;  
 $\mu_0$  – опорное значение вязкости (reference viscosity), Па·с;  
 $T_0$  – опорное значение температуры (reference temperature), К;  
 $S_\mu$  – постоянная Сазерленда (Sutherland's constant), К.

Был выбран Pressure-based solver, так как он применяется при незначительном изменении плотности и невысокими скоростями. Результаты приведены на рисунке 7 и описаны ниже.

Расчёт показал значение аэродинамического коэффициента сопротивления  $C_x$  при отсутствии дорожного полотна – 0,221, а при наличии – 0,265, что на 20 % выше, а соответственно, пропорционально увеличивается и требуемый расход энергии на преодоление сопротивления.

Единственный путь к устранению данного эффекта – увеличение зазора между днищем ТС и дорожным покрытием. В традиционном транспорте это будет иметь скорее негативный эффект, поскольку приведёт к повышению центра масс автомобиля, снижению его устойчи-

вости, увеличению миделя и усложнению конструкции, её удорожанию и увеличению габаритных размеров.

Расход топлива на сопротивление воздушной среды электромобиля при движении по дорожному полотну на скорости 90 км/ч (25 м/с) зависит от мощности потребляемой энергии  $P_w$ , Вт, которая находится по формуле:

$$P_w = \frac{\rho \cdot V^3 \cdot C_x \cdot S}{2}, \quad (6)$$

где  $C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления,  $C_x=0,265$ ;

$S$  – площадь сопротивления воздушному потоку,  $m^2$ .

На примере модели Tesla Model S с габаритными размерами: ширина 1964 мм, высота 1435 мм, клиренс 150 мм, площадь не превышает  $S = 2,6 m^2$  (получено с 3D модели транспорта). При  $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$  и  $V = 25 \text{ м/с}$  согласно (6) мощность, требуемая для преодоления аэродинамического сопротивления электромобиля, движущегося по сплошному дорожному полотну, равна  $P_w = 6,59 \text{ кВт}$ , а в случае его отсутствия (при  $C_x = 0,221$ )  $P_w = 5,5 \text{ кВт}$ .

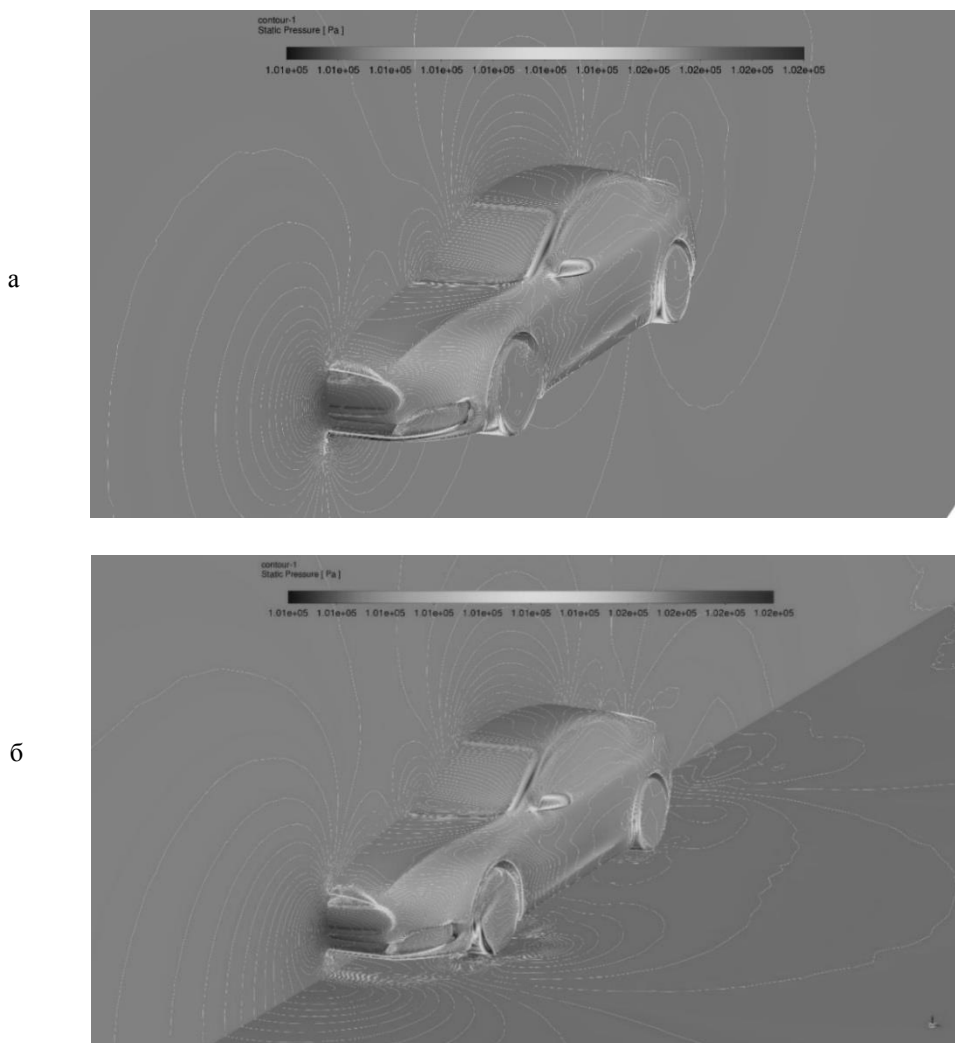


Рис. 7. Распределение статического давления при движении электромобиля Tesla Model S  
а – без дорожного полотна; б – с дорожным полотном

В качестве примера – аналога транспортного средства с отсутствующим экраном можно привести лёгкие летательные аппараты. Их особенностью является то, что для самолётов коэффициент лобового сопротивления не является постоянной величиной и меняется в зависимости от угла атаки, при этом численное значение может изменяться в 9 раз (см. рисунок 8)

для создания требуемой подъёмной силы. В отличие от дорожного транспорта, который постоянно движется параллельно земле и угол атаки равен нулю, и соответственно, подъёмная сила постоянна.

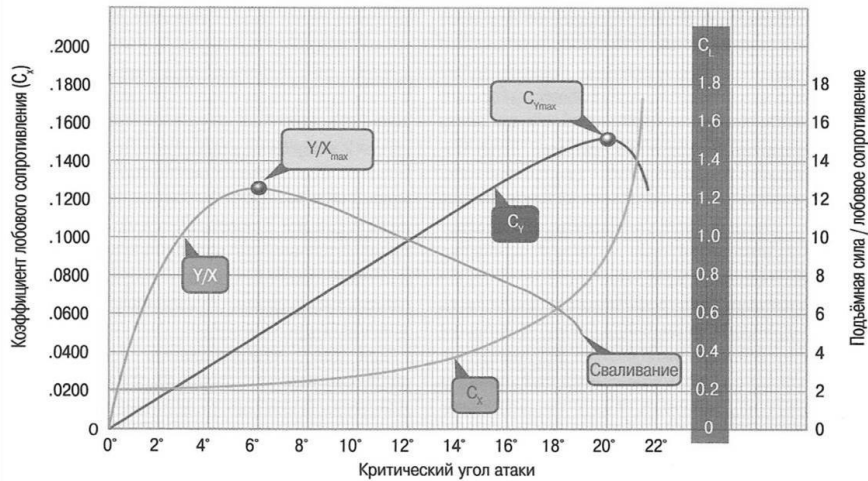


Рис. 8. Зависимость коэффициента подъёмной силы от угла атаки [14]

Если сравнить энергозатраты классической схемы традиционных автомобилей – пневмоколесо (дорожный экран, накопитель топлива (энергии)) и энергоэффективное стальное колесо (без экрана с контактной сетью на скорости 90 км/ч) – получим:  $P_{w1} = 12,3$  кВт и  $P_{w2} = 6,36$  кВт соответственно. Прямая экономия на перемещение составляет 52 %, или энергоэффективность выше в 1,93 раза.

Отдельное внимание следует уделить и системам управления электромобилей. Традиционный транспорт в этом отношении за более чем 2 000 лет не изменился. Почти 100 % всего мирового автопарка управляется человеком. К сожалению, именно человеческий фактор лежит в основе большинства дорожно-транспортных происшествий (ДТП), что подтверждает рисунок 9 [15].

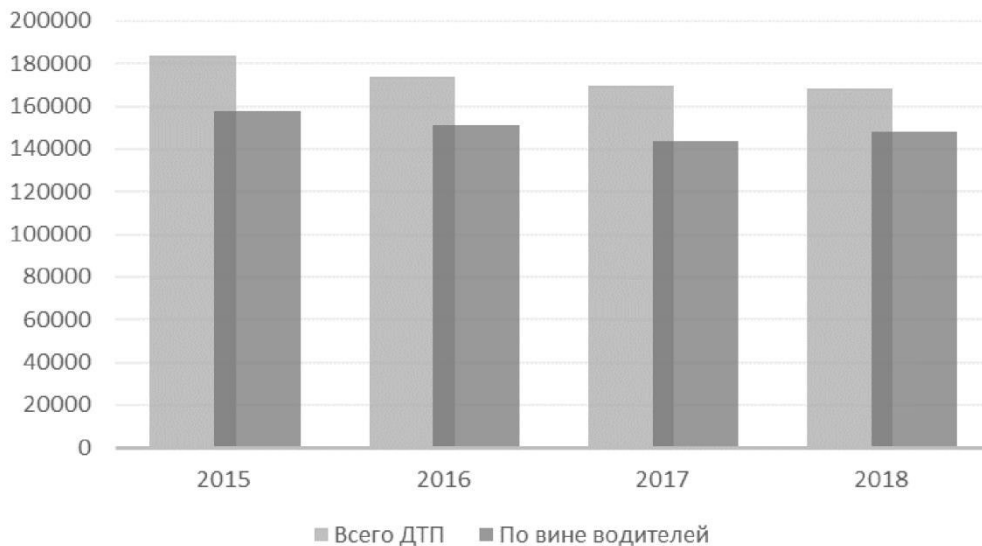


Рис. 9. Статистика ДТП, произошедших по вине водителей в Российской Федерации за 2015–2018 гг.

Практически любая нештатная ситуация приводит к заторам, и как следствие, задержкам и простоям. Во время простоя либо движения в пробках, транспорт фактически уничтожает и топливо, и электроэнергию. Согласно исследованию [16], в 2014-м году в США водители провели в пробках 6,8 миллиардов часов, при этом было сожжено 3,1 миллиарда галлонов топлива (11,7 миллионов тонн), что эквивалентно затратам (потерям) в 153 миллиарда долларов США. В пробках стоят все средние и крупные города в утренние и вечерние часы пик.

Взять, к примеру, Москву: на 6 тыс. км автодорог города установлено 56 тыс. светофоров. Это означает, что на каждый километр автодороги приходится более 9 светофоров. Как результат, средняя скорость передвижения по городу не превышает 20 км/ч вне зависимости от мощности автомобиля, типа его двигателя (электрический или с ДВС). В этой связи, лишь применение полностью автоматизированных интеллектуальных транспортных комплексов, обеспечивающих движение без остановки до точки назначения, позволит устранить простои и исключить саму возможность образования пробок.

При этом растущая перегруженность существующей автодорожной сети и транзитных путей, интенсивность движения и разнообразие участников дорожного движения делает практически невозможным использование автоматического пилотирования автомобильного транспорта как самого массового на планете. Это в меньшей степени зависит от вида энергии, обеспечивающей движение транспортного средства, а в большей – от количества машин на дорогах и неопределённости алгоритма действий, когда на пути движения автомобиля могут оказаться пешеходы, дети, животные, внезапные препятствия – природные (например, снежный сугроб, гололёд, или упавшее дерево) или техногенные (например, открытый канализационный люк или провал в дорожном полотне).

В этой связи единственными реальными способами внедрения беспилотных (автономных) систем является разделение конфликтующих факторов в пространстве – перевод транспорта на «второй уровень» над поверхностью земли или в подземные тоннели, где защищённые от внешних воздействий путепроводы, оснащённые противосходной системой, выделены исключительно для движения определённого подвижного состава в определённом направлении. При этом абсолютно все транспортные средства и элементы комплекса связаны между собой единой автоматизированной системой управления и быстродействующей системой обмена данных в режиме реального времени.

Исходя из всего вышеперечисленного, можно заключить, что, с технической точки зрения, энергоэффективный транспорт будущего – это комплекс, обеспечивающий эффективное и надёжное перемещение пассажиров и грузов при минимальном потреблении энергии, минимизации вредных выбросов и воздействии на окружающую среду при производстве, эксплуатации и утилизации, отвечающий повышенным требованиям к безопасности всех операций и включающий в себя:

1) рельсовые беспилотные электрические машины,двигающиеся по выделенным траекториям, оснащённые противосходной системой и объединённые единой системой автоматического управления;

2) рельсовые пути, расположенные над поверхностью земли без использования земляной насыпи (низконапорной плотины для естественного движения грунтовых и поверхностных вод и преграды для миграции животных) и без образования сплошного дорожного полотна, что исключительно важно для высокоскоростного движения, в котором на преодоление аэродинамического сопротивления расходуется до 90 % энергии;

3) систему электропитания: аварийную бортовую и основную внешнюю – контактную сеть, что исключит необходимость в тяговых аккумуляторных батареях и устранит все проблемы, связанные с ними;

4) сопутствующую инфраструктуру на «втором уровне» – пассажирские станции, грузовые терминалы, депо, парковки, автоматизированную систему управления, стрелочные переводы и т. п.

### **Энергоэффективный транспорт будущего**

Описанные выше комплексные подходы к созданию энергоэффективного транспорта легли в основу инновационных решений при разработке струнного транспорта Юницкого uST [17, 18]. В качестве дороги здесь используется рельсо–струнная эстакада «второго уровня», она может применяться как для пассажирских, так и для грузовых перевозок – при скорости транспортных средств до 150 км/ч в городе и до 500 км/ч – в междугороднем сообщении. В путевых структурах используются преднапряжённые высокопрочные проволоки или

канаты, обеспечивающие несущую способность и отсутствие температурных стыков поверхности качения (рисунок 10).

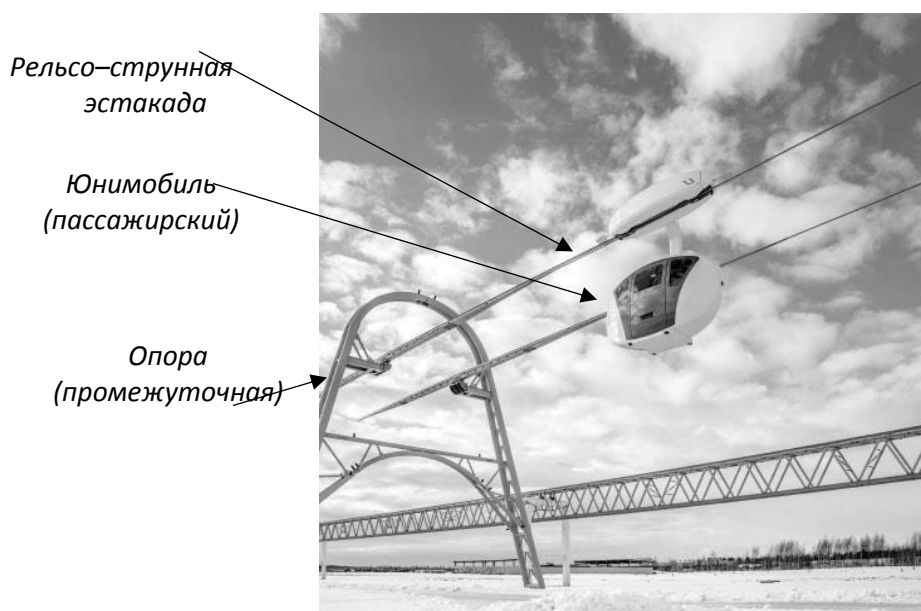


Рис. 10. Струнный транспорт uST (вариант), г. Марьина Горка (Беларусь)

Конструкция такой дороги не занимает землю (кроме точечного опирания опор), не требует строительства массивной железобетонной эстакады, долговечна, надёжна, имеет противосходную систему, не обладает паразитным экраным эффектом и в разы снижает потребность в ресурсах (земельных, сырьевых, энергетических, финансовых, иных) на всём жизненном цикле – строительстве, эксплуатации, утилизации – в сравнении с традиционными транспортными решениями. При этом городской комплекс струнного транспорта может осуществлять перевозку до 50 тысяч пассажиров в час в зависимости от степени загруженности и особенностей маршрута.

Благодаря особенностям проектных решений транспортных комплексов uST, на порядок и более снижается материалоемкость путевых конструкций эстакадного типа по сравнению с традиционной железной либо автомобильной дорогой. Экономия материалов, затрачиваемая на строительство комплекса, повышает энергетическую эффективность, поскольку требуется меньше затрат энергии на добычу, доставку и переработку природных материалов, а также снижаются энергетические затраты при работе дорожной и строительной техники на возведение путевых структур эстакадного типа за счёт уменьшения их материалоемкости и доли земляных работ (объём земляных работ снижен примерно на два порядка).

Рельсо-струнная путевая структура не требует очистки от снега и льда зимой и применения антиобледенительных солей (в отличие от автомобильных дорог) в северных регионах или от песка и пыли – в регионах пустынь. Это повышает энергоэффективность и безопасность движения и исключает образование пробок по указанным причинам.

Расчёты и опытная эксплуатация транспортных систем uST в Беларуси (рисунок 11) и Объединённых Арабских Эмиратах (рисунок 12), начиная с 2016 г., продемонстрировали возможность снижения коэффициента аэродинамического сопротивления формы рельсового электромобиля на стальных колёсах, получившего название юнимобиль, до 0,06, за счёт комплексного решения – применения высокоаэродинамичной формы и устранения экранного эффекта.

Поскольку транспортный комплекс uST располагается на втором уровне, у него нет необходимости в нецелесообразных остановках вроде светофора либо с целью пропуска пешеходов. Разнесение путевых структур по высоте позволит избежать необходимости бесцельного сжигания топлива и электроэнергии на перекрёстках. Исчезнет необходимость в нецелевом рассеивании энергии в торможение и её перерасхода для последующего разгона. Отсутствие скоростных

ограничений, в том числе для городского транспорта, позволит увеличить среднюю скорость движения и повысить производительность грузопассажирского комплекса.



Рис. 11. Юнимобиль на гибкой рельсо-струнной эстакаде, ЭкоТехноПарк, г. Марьина Горка (Беларусь)



Рис. 12. Центр испытаний и сертификации uSky (Шарджа, ОАЭ)

Юнимобили uST спроектированы таким образом, что даже в случае нештатной ситуации, при которой происходит утрата возможности самостоятельного перемещения, универсальное их исполнение позволяет осуществить автоматическую буксировку предшествующим либо последующим юнимобилем, вплоть до места технического обслуживания подвижного состава.

Таким образом, комплексный подход в проектировании транспортной структуры и подвижного состава uST, не ограниченный исторически сложившимися конструктивными и технологическими стандартами, позволяет применить оптимальные, с энергетической и затратной точки зрения, инженерные и технологические решения. Разработанные транспортно-инфраструктурные комплексы uST (пассажирские и грузовые, городские и междугородные, подвесные и навесные, скоростные и высокоскоростные), по приведённым расчётам, энергоэффективнее современного электромобиля более чем в 2 раза при скорости движения 90 км/ч, и в 4 и более раз – на высоких скоростях (до 500 км/ч).

### **Заключение и выводы**

Новые транспортные технологии, такие как электромобиль, поезд на магнитной подушке, наземный и подземный метрополитен, скоростной трамвай, канатная дорога, присут-

ствующие в настоящее время на мировом рынке, имеют ряд конструктивных, технологических и эксплуатационных недостатков, которые, по мнению авторов, не позволят им стать безопасным, энергоэффективным и «чистым» транспортом будущего, способным реально решить глобальные энергетические, экологические и социально-экономические вызовы, стоящие перед человечеством в 21 веке.

Проведённое моделирование эффективности использования энергии на этапах производства и эксплуатации транспортных комплексов показало реальный КПД эксплуатации автомобилей с электроприводом и двигателем внутреннего сгорания. Анализ показал низкую энергоэффективность, а соответственно и низкую экологичность применения существующего электротранспорта. Как вывод – смена вида используемой транспортным средством энергии (замена углеводородного топлива на электрическую энергию) никоим образом не улучшает общую экологическую обстановку в планетарном масштабе, а только перераспределяет региональные зоны выброса CO<sub>2</sub>, входящего в состав выхлопных или дымовых газов.

В качестве конструктивного предложения по повышению экологичности транспортных комплексов авторами предложена концепция энергоэффективного транспорта и обоснован ряд зависимостей, определяющих технические требования, которым должен удовлетворять транспорт будущего. В основу заложена идея увеличения эффективности за счёт снижения энергопотребления благодаря уменьшению (либо исключению) сил сопротивления движению: затрат на частые разгоны и торможения на перекрёстках, затрат на преодоление сопротивления качению колёс, на преодоление сил аэродинамического сопротивления, на обеспечение работы внутренних потребителей транспортного модуля (например, чем выше средняя скорость движения, тем меньше времени в пути и тем ниже будут затраты энергии на нужды внутренних потребителей). Комбинируя известные миру конструктивные решения, правильно используя физические и аэродинамические явления, был сформирован концептуальный облик транспортного средства будущего: высокоаэродинамичная оболочка беспилотного электромобиля на стальных колёсах, поднятого над землёй без образования аэродинамического экрана. Данные решения позволили снизить расход энергии/топлива примерно в 2 раза без изменений в геометрии существующих электромобилей, а с учётом улучшений их аэродинамичности – в 5–6 и более раз.

Авторами определена транспортно-инфраструктурная технология, наиболее полно отвечающей всем требованиям, предъявляемым к транспорту будущего – технология струнного транспорта uST, однако ему ещё предстоит быть внедрённым и быть опробованным не в опытной, а в массовой коммерческой эксплуатации. При этом, при успехе подобного использования технология струнного транспорта может стать основой создания новой мировой транспортно-инфраструктурной отрасли, способной решить проблемы обеспечения мобильности мирового населения на «втором уровне», логистических задач бурно растущей мировой экономики, и при этом решить большинство глобальных проблем ресурсного, энергетического, экологического и социально-экономического характера.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Ильясов Р. Х. Сплайн-анализ «тонкой» структуры взаимозависимости экспортных цен на природный газ и нефть // *π-Economy*. 2008. № 6 (68). С. 348–352.
- 2 Gartner Says 2023 Is the Moment of Truth for Battery-Electric Vehicles [Электронный ресурс]. URL: Gartner Says 2023 Is the Moment of Truth for Battery-Electric Vehicles
- 3 Meijer J. R. et al. Global patterns of current and future road infrastructure // *Environmental Research Letters*. 2018. Т. 13. № 6. С. 064006.
- 4 Roth R. Up-rise and Decline of the World's Railways—A Bird's Eye View of a 200 Years Development of a Big Infrastructure.
- 5 LowCVP study highlights importance of measuring whole life carbon emissions [Электронный ресурс] / LowCVP. URL: [https://www.zemo.org.uk/news-events/news,lowcvp-study-highlights-importance-of-measuring-whole-life-carbon-emissions\\_1644.htm](https://www.zemo.org.uk/news-events/news,lowcvp-study-highlights-importance-of-measuring-whole-life-carbon-emissions_1644.htm)
- 6 Ritchie H., Rosado P., Roser M. Electricity mix // *Our World in Data*. 2024.
- 7 Sadvovskaia K. et al. Power transmission and distribution losses—A model based on available empirical data and future trends for all countries globally // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019. Т. 107. С. 98–109.

- 8 Морозов В. А., Морозова О. Н. Совершенствование эффективности и экологичности двигателей внутреннего сгорания // Инженерный вестник Дона. 2016. Т. 40. № 1 (40). С. 5.
- 9 Селифонов В. В., Хусаинов А. Ш., Ломакин В. В. Теория автомобиля. М.: МГТУ «МАМИ». 2007. 102 с.
- 10 Астахов П.Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава // Труды ЦНИИ МПС (ISSN 0372–3305). Выпуск 311. Москва: Транспорт, 1966. 178 с.
- 11 Алижан А. Методика расчета напряженно-деформированного состояния колеса и рельса в зоне контакта. ТОО «КазахИнжиниринг». 2022.
- 12 Волков Е. В. Определение силы аэродинамического сопротивления автомобиля // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Т. 1. № 3. С. 124–127.
- 13 Аэродинамика автомобиля / Д. О. Золкин [и др.] // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. 2018. С. 124–127.
- 14 URL: <https://helpiks.org/9-27696.html>
- 15 Евтюков С. С., Голов Е. В., Коломеец А. А. Роль человеческого фактора при возникновении дорожно–транспортного происшествия // Транспортное дело России. 2019. № 2. С. 196–199.
- 16 Schrank D., Eisele B., Lomax T. 2014 Urban mobility report: powered by Inrix Traffic Data. 2015. № SWUTC/15/161302–1.
- 17 Юницкий А. Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе: науч. Издание/ Силакросс: ПНБ принт, 2019. 576 с.
- 18 Юницкий А. Э. Инженер мира: автобиография/ Минск: СтройМедиаПроект, 2022. 483 с.