

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление «Электротехника»

УДК [UDC] 656.34

DOI 10.17816/transsyst20195247-59

© О. Н. Ларин¹, А.В. Боков²

¹ Российский университет транспорта

² Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
(Москва, Россия)

О СПОСОБЕ СНИЖЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВОЗДУХА ДВИЖЕНИЮ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ВНУТРИ ТРАНСПОРТОПРОВОДА

Обоснование: Движение поезда в изолированном пространстве с естественным атмосферным давлением воздушной среды сопровождается потерями энергии на непроизводительную работу по преодолению профильных сопротивлений со стороны фронтальной и тыльной поверхностей подвижного состава. При этом также отмечается значительное увеличение затрат энергии на преодоление растущей силы встречного сопротивления воздуха. Для исключения указанных потерь энергии предлагается организовать синхронное и сбалансированное по объёмам откачивание воздуха из передней части транспортногопровода и нагнетание воздуха в заднюю часть транспортногопровода.

Цель: Разработать способ организации воздухообмена внутри транспортногопровода, который обеспечит снижение профильных сопротивлений воздуха движению поезда.

Методы: Предложенные разработки основаны на общеизвестных отечественных и зарубежных конструкциях высокоскоростных транспортных систем трубного типа, использовались результаты сравнительного анализа транспортныхпроводов с различной степенью откачки воздуха (глубоким вакуумом и форвакуумом), учитывался опыт перераспределения остаточного объёма воздуха в транспортномпроводе в системах “Hyperloop” и “TransPod”. Параметры работы компрессорных установок, перекачивающих воздух во внутренней полости транспортногопровода при движении транспортного средства, регулируются на основе моделей процесса газодинамики.

Результаты: Разработаны новый способ и устройство снижения силы сопротивления воздуха движению поезда путём принудительного воздухообмена, который предусматривает перераспределение воздуха из передней части в заднюю часть транспортногопровода относительно направления движения транспортного средства. Для перераспределения воздуха используется устройство внешнего воздухообмена, состоящее из воздухопроводов, компрессорных установок, задвижек, воздухонакопителя. Процесс внешнего воздухообмена производится только во время движения поезда, для движения транспортного средства предварительная откачка воздуха не требуется. Процесс перераспределения воздуха регулируется с учётом скорости движения транспортного средства, его местоположения в транспортномпроводе, конструктивных особенностей тоннеля и подвижного состава. Скорость движения транспортного

средства по каждому отрезку скоростного участка нормируется в зависимости от фактической производительности компонентов воздухообменной системы. Режимы работы компрессорных установок должны обеспечивать синхронное перераспределение воздуха из передней части в заднюю часть транспортпровода. Движение поезда по транспортпроводу с нормальным атмосферным давлением во внутренней полости обеспечивает условия для безопасной транспортировки грузов и пассажиров.

Заключение: Разработанный способ предназначен для снижения силы сопротивления воздуха при движении транспортного средства внутри герметичного транспортпровода без создания вакуума. Представленные разработки имеют перспективы использования в проектах высокоскоростных транспортных систем подземного и подводного исполнения.

Ключевые слова: высокоскоростные транспортные системы, вакуумный трубный транспорт, профильное сопротивление воздуха, воздухообмен, Гиперлуп.

Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field “Electrical Engineering”

© Oleg N. Larin¹, Alexander V. Bokov²

¹Russian University of Transport (MIIT)

²Plekhanov Russian University of Economics
(Moscow, Russia)

DECREASING OF PROFILE AIR DRAG TO THE TRAIN MOVEMENT INSIDE THE TUBE TRANSPORT

Background: The movement of the train in an insulated space with the natural atmospheric pressure is accompanied by energy losses for unproductive work to overcome the profile air drag from the front and rear surfaces of the vehicle. At the same time, there is also a considerable increase of energy costs for overcoming the growing force of oncoming air drag. In order to exclude these energy losses, it is proposed to organize synchronous and volume-balanced pumping of air from the front part of the tube transport and injection of the air into the back part of the tube transport.

Aim: To develop a method of organising air exchange inside the tube transport, which will ensure the reduction of air resistance to the movement of the train.

Methods: The proposed developments are based on well-known national and foreign designs of high-speed tube transport systems, the results of a comparative analysis of tube transport with varying degrees of air pumping (backing vacuum and hard vacuum), taking into account the experience of redistributing the residual air volume in the “Hyperloop” and “TransPod” tube transport systems. The operating parameters of the compressor units that pump air into the internal cavity of the tube when the train is in motion is regulated on the basis of process models of gas dynamics.

Results: A new method and device has been developed for reducing the air drag to the movement of the train by forced air exchange, which provides for the redistribution of air from the front to the rear of the transport tube relative to the vehicle travel direction. For the air redistribution, the external air exchange unit, consisting of air ducts, compressor units,

gate valves, and air collectors is used. The process of external air exchange takes place only when the vehicle is in motion, for the movement of the vehicle no prior air exhaust is required. The air redistribution is controlled taking into account the speed of the train, its location in the tube, the design features of the tunnel and vehicle. The speed of the train for each segment of the speed section is normalised depending on the actual performance of the components of the air exchange system. Modes of operation of the compressor units must ensure synchronous redistribution of air from the front to the rear of the tube. The movement of a vehicle along a tube with normal atmospheric pressure in the internal cavity provides conditions for the safe transportation of goods and passengers.

Conclusion: The developed method is designed to reduce the force of air resistance when the train is in motion inside the airtight tube without creating vacuum. The presented developments have good prospects for use in projects of high-speed transport systems of both underground and underwater designs.

Keywords: high-speed transportation systems, evacuated tube transport, profile air drag, air exchange, Hyperloop.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день известны различные концептуальные варианты высокоскоростных транспортных систем тоннельного и трубного типа, которые проектируются для перевозки грузов и пассажиров со скоростью более одной тысячи километров в час. Наибольшей популярностью в среде разработчиков пользуются вакуумные транспортные системы с герметичными транспортными трубами, из которых воздух, создающий сопротивление движению транспортного средства в изолированном пространстве, откачивается при помощи компрессорных установок (Evacuated tube transport). Для безопасной перевозки грузов и пассажиров по вакуумным транспортным системам необходимо использовать специализированный подвижной состав с прочным герметичным корпусом, способным сохранять атмосферное давление внутри салона при значительно ниже атмосферного давления снаружи корпуса (то есть в транспортном трубе). К основным конкурентным преимуществам вакуумных транспортных систем, по сравнению с другими видами транспорта, относятся: высокая скорость движения транспортного средства при низких эксплуатационных расходах (так как в безвоздушном пространстве подвижной состав не тратит энергию на преодоление силы сопротивления встречного воздушного потока); независимость работы от метеорологических условий (ветра, тумана, осадков); исключение столкновений движущихся транспортных средств.

Преимущественной сферой применения вакуумных транспортных систем являются перевозки грузов и пассажиров на магистральных сообщениях между крупными мегаполисами. На таких маршрутах вакуумные транспортные системы способны конкурировать даже с воздушным транспортом, так как самолет тратит время и энергию для

подъема на высоту с низкой плотностью воздушной среды, в которой осуществляет скоростное перемещение. В свою очередь транспортное средство при движении в вакуумном транспортопроводе переходит в аналогичный режим работы (с низкой плотностью встречного воздушного потока) без дополнительных потерь времени и энергии. Наибольший эффект от эксплуатации вакуумных транспортных систем может быть получен при их интеграции с городскими транзитными системами, в частности, метрополитеном, пригородными поездами [1-4]. Однако вакуумные транспортные системы имеют ряд недостатков: требуются значительные капитальные расходы на их сооружение; необходимо обеспечивать безопасность перевозок в условиях низкого давления; расходы на обслуживание трубопровода могут превысить эффект от увеличения скорости сообщений [5].

МЕТОДЫ

Основным конструктивным элементом высокоскоростных транспортных систем тоннельного и трубного типа является изолированный от внешней окружающей среды транспортопровод, который состоит из корпуса, как правило, округлой формы, и транспортопроводящего пути, используемого для движения транспортного средства. Первые прототипы высокоскоростных трубных систем, основанные на вакуумном способе снижения силы сопротивления воздуха движению транспортного средства в герметичном транспортопроводе, появились более ста лет назад. Например, российский ученый Борис Петрович Вейнберг и американский инженер Роберт Годдард (Robert H. Goddard) независимо друг от друга предложили организовать движение транспортного средства на высокой скорости внутри трубы, из которой должен быть откачен воздух [6-7].

В течение двадцатого века концептуальные подходы к проектированию вакуумных транспортных систем активно развивались. Предлагались различные модификации конструкций транспортопровода, адаптировались инновационные силовые установки для привода транспортного средства. Например, американский изобретатель Дэрил Остер (Daryl Oster) запатентовал совмещенную конструкцию из нескольких вакуумных трубопроводов, по которым должно осуществляться движение транспортных средств по встречным направлениям [8-9].

Современные модели трубных транспортных систем, которые предусматривают использование вакуумного способа снижения силы воздушного сопротивления движению транспортного средства, разделяются на два основных конструктивных типа в зависимости от степени снижения давления воздушной среды во внутренней полости

транспортопровода. Во-первых, системы с глубоким вакуумом (*hard vacuum*), внутри которых давление снижается менее 1 Па. Во-вторых, системы с форвакуумом (*vorvakuum*), в которых давление снижается ниже 100 Па. По мнению многих экспертов, наиболее перспективными являются форвакуумные транспортные системы, так как затраты на их создание и эксплуатацию значительно меньше по сравнению с необходимыми капитальными вложениями в глубоковакуумные транспортные системы, а различия между данными транспортными системами по технико-эксплуатационным показателям работы незначительны. При этом наибольшим потенциалом обладают форвакуумные транспортные системы, использующие для движения транспортного средства магнитолевитационную технологию. Такие конструкции по экологическим и экономическим показателям способны превзойти все существующие альтернативные системы транспортировки [10].

Однако скоростные возможности и экономическая эффективность форвакуумных систем ограничиваются фундаментальными факторами, которые известны в теории газовой динамики как “предел Кантровица” (*Kantrowitz limit*) [11-13]. Данные факторы проявляются при движении транспортного средства со сверхзвуковой скоростью в изолированной среде и характеризуются тем, что воздух перестает просачиваться из передней части внутренней полости транспортопровода (расположена перед головной частью движущегося подвижного состава) в заднюю часть, расположенную за хвостовой частью движущегося подвижного состава, через межстеночное пространство, которое формируется корпусом транспортопровода и транспортного средства. Оставшийся (не просочившийся) воздух создает избыточное давление перед транспортным средством и усиливает сопротивление его движению по транспортопроводу.

Для обеспечения свободного перетока воздуха через межстеночное пространство в форвакуумных системах применяются особые формы конструкций подвижного состава и увеличивается диаметр транспортопровода до такого размера, при котором весь объем остаточного воздуха, независимо от скорости движения транспортного средства, будет беспрепятственно проходить из передней части в заднюю часть транспортопровода и заполнять разряженное пространство за транспортным средством. Однако данные способы также не лишены недостатков. В частности, создание и эксплуатация вакуумных транспортных систем с большим диаметром транспортопровода приводит к росту затрат и негативно отражается на окупаемости инвестиций в подобные проекты.

Поэтому для форвакуумных транспортных систем также является актуальной задача снижения силы сопротивления встречного воздушного потока движению транспортного средства посредством принудительного

перераспределения воздуха из передней части в заднюю часть транспортпровода. В контексте настоящего исследования совокупность действий, которые или в результате которых обеспечивается перераспределение воздуха из передней части в заднюю часть транспортпровода будем называть процессом воздухообмена.

В форвакуумных транспортных системах “Hyperloop” и “TransPod” процесс воздухообмена предлагается осуществлять в границах внутренней полости транспортпровода при помощи устройств, входящих в конструкцию транспортного средства. Данный способ будем называть “внутренним воздухообменом”. Основным конструктивным элементом, применяемым для “внутреннего воздухообмена” в вакуумных транспортных системах, является компрессорная установка, которая располагается в головной части подвижного состава. В “Hyperloop” компрессорная установка перераспределяет встречный поток воздуха под днище транспортного средства для создания воздушной подушки, облегчающей движение подвижного состава [13]. В “TransPod” компрессорная установка перекачивает воздух по каналам в корпусе подвижного состава и выбрасывает его (воздух) через выпускное сопло в заднюю часть транспортпровода. При этом на выходе из сопла создается реактивная тяга, которая используется для дополнительного ускорения транспортного средства [14].

Однако организация “внутреннего воздухообмена” по вариантам “Hyperloop” and “TransPod” снижает провозные возможности и эффективность работы подобных транспортных систем, так как размещение на подвижном составе дополнительного оборудования (компрессорных установок, воздухопроводов и пр.) приводит к сокращению вместимости и грузоподъемности подвижного состава. Более того, конструкции “Hyperloop” and “TransPod” имеют еще ряд недостатков, которые характерны для всех моделей вакуумных транспортных систем форвакуумного и глубоковакуумного типа. В частности, снижение силы сопротивления воздуха движению транспортного средства за счет создания вакуума в транспортпроводе сопряжено с риском повреждения пассажиров или грузов в случае разгерметизации корпуса транспортного средства. Кроме того, на создание вакуумных транспортных систем потребуется значительный объем инвестиций, так как конструкции транспортпроводов и подвижного состава, предназначенных для работы в условиях с большими перепадами давлений, должны обладать повышенной прочностью, а эксплуатация данных систем будет сопровождаться дополнительными эксплуатационными расходами на устранение возможных протечек воздуха через стенки трубного корпуса. На время поиска протечек и ремонта корпуса движение поездов потребуется останавливать. Поэтому представляется более перспективным использование высокоскоростных “безвакуумные” трубных транспортных

систем с нормальным атмосферным давлением, в которых для снижения профильного сопротивления движению транспортного средства предлагается организовать процесс “внешнего воздухообмена” между передней и задней частями внутренней полости транспортнопроводящей конструкции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основная цель внедрения предлагаемого “безвакуумного” способа снижения силы сопротивления воздуха движению транспортного средства состоит в повышении эффективности и безопасности процесса транспортировки грузов и пассажиров по герметичным транспортнопроводам за счёт организации “внешнего воздухообмена” между передними и задними частями транспортнопроводов.

Движение транспортного средства в изолированном пространстве с естественным атмосферным давлением воздушной среды сопровождается потерями энергии на непроизводительную работу по преодолению профильных сопротивлений со стороны фронтальной и тыльной поверхностей подвижного состава, обусловленных нежелательным изменением давления в транспортнопроводе – в передней части транспортнопровода происходит нагнетание давления и уплотнение воздуха, в задней части отмечается уменьшение давления и плотности воздушной среды. Характерные изменения параметров воздуха в связи с движением транспортного средства называются поршневым эффектом [15]. При поршневых эффектах отмечается значительное увеличение затрат энергии на преодоление растущей силы встречного сопротивления воздуха, величина которой пропорциональна квадрату скорости движения транспортного средства [16]. Для исключения указанных энергетических потерь предлагается организовать синхронное и сбалансированное по объемам откачивание воздуха из передней части транспортнопровода и нагнетание воздуха в заднюю часть транспортнопровода. Общий принцип осуществления процесса внешнего воздухообмена и конструктивные элементы устройства, применяемые для осуществления данного процесса, показаны на Рис.

Перераспределение воздушного потока между передней (1) и задней (2) частями транспортнопровода осуществляется путем организации внешнего воздухообмена через обособленный по отношению к транспортнопроводу воздухонакопитель (3), представляющий собой типичный резервуар для хранения газов, как правило, цилиндрической формы, сварной конструкции с повышенными требованиями к материалам, применяемым для их изготовления.

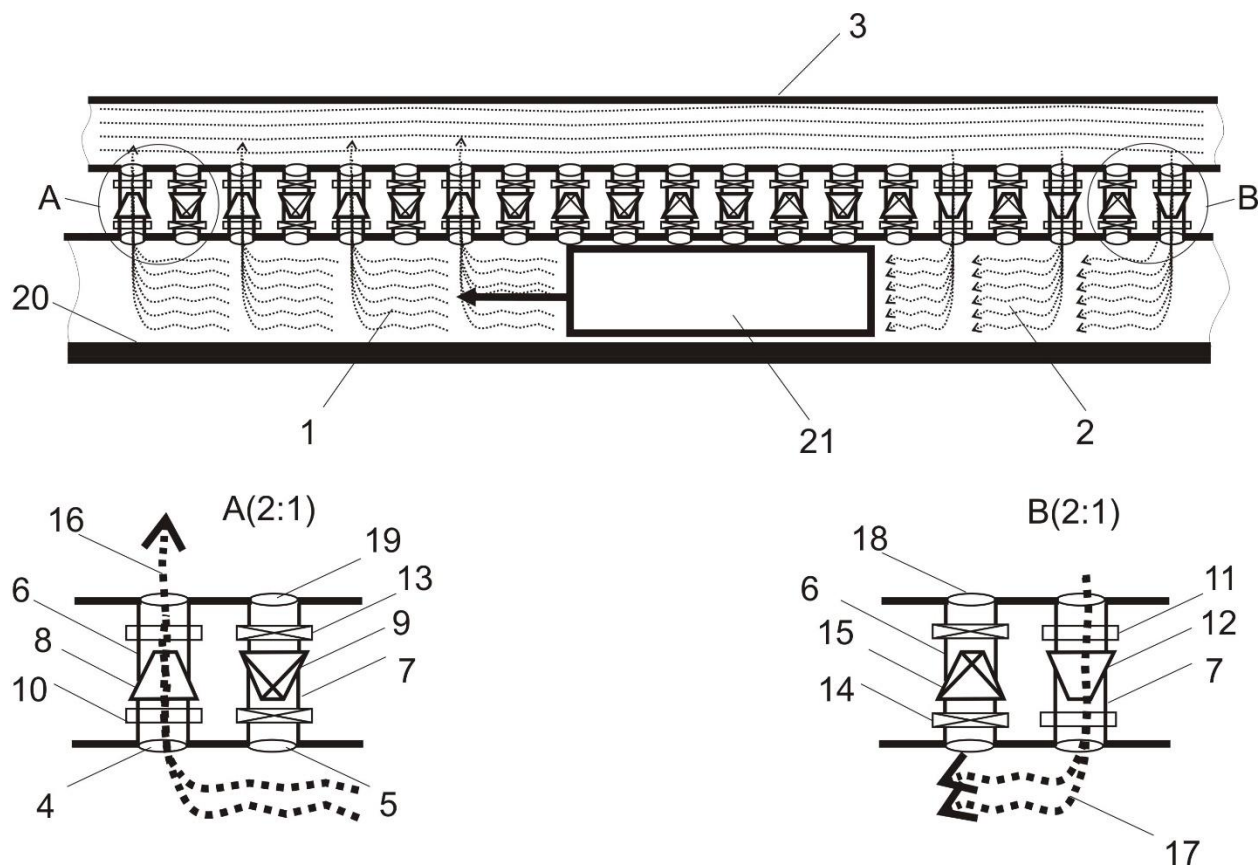


Рис. Общая структура и принцип действия устройства внешнего воздухообмена с обособленными воздуховодами:

1 – передняя часть трубопровода (область повышенного давления воздуха);
 2 – задняя часть трубопровода (область пониженного давления воздуха);
 3 – воздухонакопитель; 4 – сквозное отверстие в корпусе трубопровода для откачки воздуха; 5 – сквозное отверстие в корпусе трубопровода для нагнетания воздуха; 6 – обособленный отводящий воздуховод; 7 – обособленный нагнетающий воздуховод; 8 – отводящие компрессорные установки включены; 9 – нагнетающие компрессорные установки выключены; 10 – задвижка отводящего воздуховода в открытом положении; 11 – задвижка нагнетающего воздуховода в открытом положении; 12 – нагнетающие компрессорные установки включены; 13 – задвижка нагнетающего воздуховода в закрытом положении; 14 – задвижка отводящего воздуховода в закрытом положении; 15 – отводящие компрессорные установки выключены; 16 – направление движение воздуха из трубопровода в воздухонакопитель; 17 – направление движение воздуха из воздухонакопителя в трубопровод; 18 – сквозное отверстие в корпусе воздухонакопителя для откачивания воздуха; 19 – сквозное отверстие в корпусе воздухонакопителя для нагнетания воздуха; 20 – корпус трубопровода; 21 – транспортное средство.

Для организации внешнего воздухообмена в корпусе трубопровода делается, по меньшей мере, одно сквозное отверстие (4) для откачки воздуха, и, по меньшей мере, одно сквозное отверстие (5) для нагнетания воздуха. Отверстия изготавливаются, как правило,

округлой формы в поперечном сечении и равномерно распределяются по корпусу транспортпровода. Рекомендуется отверстия разных типов (для откачки и нагнетания воздуха) располагать попарно в непосредственной близости друг от друга, насколько допускают габариты конструкции транспортпровода.

Устройство внешнего воздухообмена состоит из обособленных отводящих (6) и нагнетающих (7) воздухопроводов, по которым соответственно осуществляется откачка воздуха из транспортпровода и подача воздуха в транспортпровод; воздухонакопителя (3), принимающего откачиваемый воздух из передней части транспортпровода, и откуда отбирается воздух для нагнетания в заднюю часть транспортпровода; компрессорных установок (8) и (9), выполняющих работу по перекачке воздуха; задвижек, которые используются для предотвращения перетока воздуха между транспортпроводом и воздухонакопителем при отключенных компрессорных установках. На Рис. 1 задвижки (10) и (11) показаны в открытом положении, когда отводящий (8) и нагнетающий (12) компрессоры включены, а задвижки (13) и (14) показаны в закрытом положении, когда компрессоры нагнетающий (9) и отводящий (15) компрессоры отключены. При данном рабочем состоянии элементов воздухообменного устройства воздух из передней части транспортпровода (1) перемещается в воздухонакопитель (16) и из воздухонакопителя перемещается (17) в заднюю часть транспортпровода (2). Возможна организация процесса воздухообмена без использования устройства воздухонакопителя напрямую через атмосферу. Такая конструкция может применяться для снижения затрат на сооружение высокоскоростной транспортной системы наземного исполнения.

Совокупность отводящих воздухопроводов с задвижками и компрессорными установками образуют отводящую систему. Аналогично совокупность нагнетающих воздухопроводов с задвижками и компрессорными установками образуют нагнетающую систему. Конструктивно и функционально соединенные в единое устройство отводящие воздухопроводы, задвижки и компрессорные установки, равно как и соединенные нагнетающие воздухопроводы, задвижки и компрессорные установки, образуют обособленные узлы соответствующих воздухоотводящей или воздухонагнетающей систем (далее – компоненты воздухообменной системы).

Отводящие (8) и нагнетающие (9) воздухопроводы герметично прикрепляются (свинчиванием, сваркой или другими надежными способами) к транспортпроводу и воздухонакопителю по периметру соответствующих сквозных отверстий (4) и (5). Аналогичным образом воздухопроводы прикрепляются к воздухонакопителю (3) по периметру сквозных отверстий (18) и (19) в его корпусе. Герметичное соединение

транспортипровода и воздухонакопителя позволяет создавать высокоскоростные транспортные системы подземного и подводного исполнения.

При необходимости интенсивность воздухообмена может быть повышена за счет добавления дополнительных откачивающих и нагнетающих воздухопроводов. При этом возможно уплотнение воздухопроводов (6) и (7) путем их присоединения к транспортипроводу или воздухонакопителю через совмещенные сквозные отверстия (4) и (5), либо (18) и (19) соответственно. Такое конструктивное решение также позволяет уменьшить габаритные размеры воздухонакопителя.

Организация внешнего воздухообмена предусматривает регулирование работы задвижек и компрессорных установок в автоматическом режиме на основе данных о фактическом местонахождении транспортного средства во внутренней полости транспортипровода и скорости его движения. Для сбора соответствующей информации могут применяться электронные датчики, встроенные в транспортипроводящий путь, корпус транспортипровода и подвижной состав [14, 17-20]. Скорость движения транспортного средства по каждому отрезку скоростного участка нормируется в зависимости от фактической производительности компонентов воздухообменной системы. При этом вопросы регулирования работы компонентов воздухообменной системы являются самостоятельной темой исследования и не рассматриваются в рамках настоящей статьи.

Выводы

Разработанный способ предназначен для снижения силы сопротивления воздуха при движении транспортного средства внутри герметичного транспортипровода без создания вакуума. При этом представленные в статье результаты исследования и предложенные разработки не имеют цели поставить под сомнение перспективность разработки и эффективность использования вакуумных транспортных систем. Авторы стремятся привлечь внимание специалистов к необходимости дальнейшего развития систем и конструкций, которые способны обеспечить снижение профильных сопротивлений воздуха движению транспортных средств с высокой скоростью по транспортипроводам тоннельного и трубного типа. По мнению авторов, подобные транспортные системы имеют перспективы для широкого применения. В последнее время обсуждаются различные проекты сооружения подобных конструкций подземного и подводного исполнения. Например, Национальное консультативное бюро из Объединенных Арабских Эмиратов объявило о планах строительства подводного туннеля между Фуджейрой (ОАЭ) и Мумбаи (Индия), который будет находиться на

углублении от поверхности Индийского океана. По герметичному тоннелю планируется организовать скоростное движение железнодорожных поездов, а также провести трубопроводы с нефтью, газом и водой. Дополнительно обсуждается вопрос прокладки в тоннеле изолированного форвакуумного железнодорожного транспортпровода. При этом параметры подводного тоннеля позволяют разместить в нём предлагаемую авторами статьи систему внешнего воздухообмена, которая позволит упростить конструкцию тоннеля и повысить скорость движения поездов. Разработанный авторами способ также может быть использован при организации железнодорожного сообщения по тоннелю между Хельсинки и Таллинном, который планируется построить в ближайшие годы по дну Балтийского моря.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность организаторам и участникам 7-й Международной научно-практической конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» (МТСТ'19), в рамках которой прошло обсуждение представленной выше разработки и были высказаны весьма ценные замечания и предложения, что позволило авторам улучшить структуру статьи и сделанные в ней выводы.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Zhang Y, Li Y. Role and Position of ETT in the Future Comprehensive Transportation System. In: International Conference of Transportation Engineering, Chengdu, China. *The American Society of Civil Engineers (ASCE)*. 2007;(7):2796-2803. doi: 10.1061/40932(246)459.
2. Oster D, Kumada M, Zhang YJ. Evacuated tube transport technologies (ET3)tm: a maximum value global transportation network for passengers and cargo. *Journal of Modern Transportation*. 2011;(19):42-50. doi: 10.1007/BF03325739.
3. Ларин О.Н., Козицкий Ю.Г. Принципы создания скоростных систем городского пассажирского транспорта // Инновационный транспорт. – 2014. – № 4(14). – С. 14–17. [Larin ON, Kozitsky YG. Principles of high-speed urban transport systems creation. *Innotrans*. 2014;4(14):14-17. (In Russ.)].
4. Chevtchenko OA, Bakker R, Oster D, et al. Closing the infrastructure gap through innovative and sustainable solutions. Strategy innovation paper. PBD Industries, Inc. ET3 GA. [Internet]. [cited 2018 March 7]. Available from: [http://et3.eu/images/upload/Strategy%20innovation%20paper%20ET3\(1\).pdf](http://et3.eu/images/upload/Strategy%20innovation%20paper%20ET3(1).pdf).

5. Zhang YP, Li SS, Wang MX. Main Vacuum Technical Issues of Evacuated Tube Transportation. *Physics Procedia*. Elsevier BV; 2012;32:743-747. doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.628
6. Robert DA. Robert H. Godard's "High-Speed Bet". *Executive Intelligence Review*. 1991;18(42):34-35.
7. Вейнберг Б.П. Движение без трения (безвоздушный электрический путь). – СПб: Книгоиздательство «Естествоиспытатель», 1914. [Weinberg BP. Dvizhenie bez treniya (bezvozdushnyj elektricheskij put'). St. Petersburg: Knigoizdatel'stvo "Estestvoispyatel"; 1914. (In Russ.)]. Доступно по: http://weinberg.o7.ru/pdf/no_friction_motion.pdf. Ссылка активна на: 23.05.2019.
8. Pat. US 2014/0261054A1/ 18.09.2014. Oster D. Evacuated tube transport system with interchange capability. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3c/8c/fe/b634c1cb6fed33/US20140261054A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
9. Pat. 2014/0261055 A1/ 18.09.2014. Oster D. Evacuated tube transport system with improved cooling for superconductive elements. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/13/86/e6/4700df8c842239/US20140261055A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
10. Salter RM. The Very High Speed Transit System. RAND Corporation. 1972 Aug. Available from: <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/papers/2008/P4874.pdf>. Accessed May 23, 2019.
11. Kantrowitz A, Donaldson P. C. Preliminary investigation of supersonic diffusers. Washington: Langley Field, VA; 1945 May. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3c/8c/fe/b634c1cb6fed33/US20140261054A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
12. Sudip D, Jai P. Starting Characteristics of Rectangular Supersonic Air-Intake with Cowl Deflection. *The Aeronautical Journal*. March 2010;114(1153):177-189.
13. Hyperloop Alpha. SpaceX. 2013 Aug. Available from: https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf. Accessed May 23, 2019.
14. Janzen R. TransPod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure. In: X International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2017. *Procedia Engineering*. 2017;199:8-17. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.142
15. Красюк А.М., Лугин И.В., Павлов С.А. и др. Влияние поршневого действия поездов на тоннельную вентиляцию метрополитенов мелкого заложения // Метро и тоннели. – 2010. – № 2. – С. 30–32. [Krasyuk AM, Lugin IV, Pavlov SA, et al. Vliyanie porshneвого dejstviya poezdov na tonnel'nyuyu ventilyaciyu metropolitenov melkogo zalozheniya. *Metro i tonneli*. 2010;(2):30-32. (In Russ.)].
16. Чурков Н.А., Битюцкий А.А., Кручек В.А. Влияние воздушной среды на поезд // Известия ПГУПС. – 2013. – Вып. 2. – С. 20–26. [Churkov NA, Bityutsky AA, Kruchek VA. Effect of air on the train. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2013;(2):20-26. (In Russ.)]. Доступно по: <http://izvestiapgps.org/assets/files/10.20295-1815-588X-2013-2/10.20295-1815-588X-2013-2-5-11.pdf>. Ссылка активна на: 23.05.2019.
17. Nikolaev R, Idiatuallin R, Nikolaeva D. Software system in Hyperloop pod. Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems. Proceedings of the 22nd International Conference, KES-2018, Belgrade, Serbia. *Procedia Computer Science*. 2018;126:878-890. doi: 10.1016/j.procs.2018.08.022
18. ERTMS – Delivering Flexible and Reliable Rail Traffic. A major industrial project for

- Europe. European Commission, Energy and Transport DG. 2006 Mar. Available from: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0c77ec53-5fd5-4e8f-a743-1c5d1415ffe6/language-en>. Accessed May 23, 2019.
19. Розенберг Е.Н., Озеров А.В. Построение систем управления и обеспечения безопасности движения поездов на ВСМ // Железнодорожный транспорт. 2018. – № 3. – С. 34–42. [Rosenberg EN, Ozerov AV. Postroenie sistem upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov na VSM. *Zheleznodorozhnyj transport*. 2018(3):34-42. (In Russ.)].
 20. Куприяновский В.П., Аленков В.В., Климов А.А. и др. Цифровая железная дорога – ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13. – № 3. – С. 129–166. [Kupriyanovskiy VP, Alenkov VV, Klimov AA, et al. Digital railway - ERTMS, BIM, GIS, PLM and digital twins. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2017;13(3):129-166. (In Russ.)]. doi: 10.25559/SITITO.2017.3.546
 21. Zhang Y, Li Y. Role and Position of ETT in the Future Comprehensive Transportation System. In: International Conference of Transportation Engineering, Chengdu, China. *The American Society of Civil Engineers(ASCE)*. 2007;(7):2796-2803. doi: 10.1061/40932(246)459.
 22. Oster D, Kumada M, Zhang YJ. Evacuated tube transport technologies (ET3)tm: a maximum value global transportation network for passengers and cargo. *Journal of Modern Transportation*. 2011;(19):42-50. doi: 10.1007/BF03325739.
 23. Ларин О.Н., Козицкий Ю.Г. Принципы создания скоростных систем городского пассажирского транспорта // Инновационный транспорт. – 2014. – № 4(14). – С. 14–17. [Larin ON, Kozitsky YG. Principles of high-speed urban transport systems creation. *Innotrans*. 2014;4(14):14-17. (In Russ.)].
 24. Chevtchenko OA, Bakker R, Oster D, et al. Closing the infrastructure gap through innovative and sustainable solutions. Strategy innovation paper. PBD Industries, Inc. ET3 GA. [Internet]. [cited 2018 March 7]. Available from: [http://et3.eu/images/upload/Strategy%20innovation%20paper%20ET3\(1\).pdf](http://et3.eu/images/upload/Strategy%20innovation%20paper%20ET3(1).pdf).
 25. Zhang YP, Li SS, Wang MX. Main Vacuum Technical Issues of Evacuated Tube Transportation. *Physics Procedia*. Elsevier BV; 2012;32:743-747. doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.628
 26. Robert DA. Robert H. Godard's 'High-Speed Bet'. *Executive Intelligence Review*. 1991;18(42):34-35.
 27. Вейнберг Б.П. Движение без трения (безвоздушный электрический путь). СПб.: Книгоиздательство "Естествоиспытатель", 1914. [Weinberg BP. Motion without friction (airless electric path). St. Petersburg: Publishing house "Naturalist"; 1914. (In Russ)]. Доступно по: http://veinberg.o7.ru/pdf/no_friction_motion.pdf. Ссылка активна на: 23.05.2019.
 28. Pat. US 2014/0261054A1/ 18.09.2014. Oster D. Evacuated tube transport system with interchange capability. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3c/8c/fe/b634c1cb6fed33/US20140261054A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
 29. Pat. 2014/0261055 A1/ 18.09.2014. Oster D. Evacuated tube transport system with improved cooling for superconductive elements. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/13/86/e6/4700df8c842239/US20140261055A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
 30. Salter RM. The Very High Speed Transit System. RAND Corporation. 1972 Aug. Available from: <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/papers/2008/P4874.pdf>.

- Accessed May 23, 2019.
31. Kantrowitz A, Donaldson P. C. Preliminary investigation of supersonic diffusers. Washington: Langley Field, VA; 1945 May. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3c/8c/fe/b634c1cb6fed33/US20140261054A1.pdf>. Accessed May 23, 2019.
 32. Sudip D, Jai P. Starting Characteristics of Rectangular Supersonic Air-Intake with Cowl Deflection. *The Aeronautical Journal*. March 2010;114(1153):177-189.
 33. Hyperloop Alpha. SpaceX. 2013 Aug. Available from: https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf. Accessed May 23, 2019.
 34. Janzen R. TransPod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure. In: X International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2017. *Procedia Engineering*. 2017;199:8-17. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.142.
 35. Красюк А.М., Лугин И.В., Павлов С.А. и др. Влияние поршневого действия поездов на тоннельную вентиляцию метрополитенов мелкого заложения // Метро и тоннели. – 2010. – № 2. – С. 30–32. [Krasnyuk AM, Lugin IV, Pavlov SA, et al. Vliyanie porshneвого dejstviya poezdov na tonnel'nyuyu ventilyaciyu metropolitenov melkogo zalozheniya. *Metro i tonneli*. 2010;(2):30-32. (In Russ.)].
 36. Чурков Н.А., Битюцкий А.А., Кручек В.А. Влияние воздушной среды на поезд // Известия ПГУПС. – 2013. – Вып. 2. – С. 20–26. [Churkov NA, Bityutsky AA, Kruchek VA. Effect of air on the train. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2013;(2):20-26. (In Russ.)]. Доступно по: <http://izvestiapgps.org/assets/files/10.20295-1815-588X-2013-2/10.20295-1815-588X-2013-2-5-11.pdf>. Ссылка активна на: 23.05.2019.
 37. Nikolaev R, Idiatullin R, Nikolaeva D. Software system in Hyperloop pod. Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems. Proceedings of the 22nd International Conference, KES-2018, Belgrade, Serbia. *Procedia Computer Science*. 2018;126:878-890. doi: 10.1016/j.procs.2018.08.022.
 38. ERTMS – Delivering Flexible and Reliable Rail Traffic. A major industrial project for Europe. European Commission, Energy and Transport DG. 2006 Mar. Available from: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0c77ec53-5fd5-4e8f-a743-1c5d1415ffe6/language-en>. Accessed May 23, 2019.
 39. Розенберг Е.Н., Озеров А.В. Построение систем управления и обеспечения безопасности движения поездов на ВСМ // Железнодорожный транспорт. 2018. – № 3. – С. 34–42. [Rosenberg EN, Ozerov AV. Postroenie sistem upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov na VSM. *Zheleznodorozhnyj transport*. 2018(3):34-42. (In Russ.)].
 40. Куприяновский В.П., Аленков В.В., Климов А.А. и др. Цифровая железная дорога – ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13. – № 3. – С. 129–166. [Kupriyanovskiy VP, Alenkov VV, Klimov AA, et al. Digital railway - ERTMS, BIM, GIS, PLM and digital twins. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2017;13(3):129-166. (In Russ.)]. doi: 10.25559/SITITO.2017.3.546

Сведения об авторах:

Ларин Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор;
адрес: 127994, Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9;
eLibrary SPIN: 2283-4063; ORCID: 0000-0001-9020-2228;

E-mail: larin_on@mail.ru

Боков Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 6972-2337; ORCID: 0000-0001-9159-3566;
E-mail: av_bokov@mail.ru

Information about the authors:

Oleg N. Larin, Nikolaevich, Doctor of Engineering Sciences, Professor;
address: 127994, Moscow, 9b9 Obrazcova Street;
eLibrary SPIN: 2283-4063; ORCID: 0000-0001-9020-2228;
E-mail: larin_on@mail.ru

Alexander V. Bokov, Viktorovich, Candidate of Physical and Mathematica Sciences,
Associate Professor;
eLibrary SPIN: 6972-2337; ORCID: 0000-0001-9159-3566;
E-mail: av_bokov@mail.ru

Цитировать:

Ларин О.Н., Боков А.В. О способе снижения профильных сопротивлений воздуха движению транспортного средства внутри транспортнопровода // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 47–59. doi: 10.17816/transsyst20195247-59

To cite this article:

Larin ON, Bokov AV. Decreasing of Profile Air Drag to the Train Movement Inside the Tube Transport. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):47-59. doi: 10.17816/transsyst20195247-59