

УДК 629.016

**В. М. Фомин<sup>1</sup>, В. И. Звегинцев<sup>1</sup>, Д. Г. Наливайченко<sup>1</sup>, Ю. А. Терентьев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН

<sup>2</sup> Независимый эксперт

## **ВАКУУМНЫЙ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫЙ ТРАНСПОРТ: ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ**

Дата поступления 19.04.2016

Решение о публикации 29.04.2016

Дата публикации 30.09.2016

**Аннотация:** Известная в широком кругу специалистов транспортная концепция «Evacuated Tube Transport Technology» (ЕТЗ) («Вакуумно-Трубопроводной Транспортной Технологии» («ВТЗ»)) [1] являет собой энергоэффективный комплекс магнитолевитационной, вакуумной и сверхпроводниковой технологий для высокоскоростного наземного транспорта. Рассматриваемая концепция представляется как наиболее эффективное решение проблемы кардинального повышения скорости и пропускной способности транспортных систем с приемлемой стоимостью перемещения пассажиров и грузов и невысокими затратами энергии.

Для определения оптимальных диапазонов рабочих параметров рассматриваемой транспортной системы выполнен анализ характеристик разреженной среды. Исходя из соображений баланса энергетических затрат на поддержание вакуума в системе и преодоления аэродинамического сопротивления во всем рассматриваемом диапазоне скоростей транспортного средства (ТС) (500÷6500 км/ч) показано, что нижняя граница оптимальной глубины разрежения вакуумной среды, для ТС с относительно невысокими скоростями, находится в районе 25÷80 Па. Для ТС со скоростям, близкими к максимальной хотелось бы иметь давление от 1Па и менее.

**Ключевые слова:** вакуумный транспорт, магнитолевитационный транспорт, вакуумная система, разреженная среда, аэродинамические характеристики, оптимизация.

**Vasily M. Fomin<sup>1</sup>, Valery I. Zvegintsev<sup>1</sup>, Denis G. Nalivaichenko<sup>1</sup>,  
Yuriy A. Terent'ev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

<sup>2</sup>Independent expert

**VACUUM MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT: DEFINITION OF  
OPTIMAL CHARACTERISTICS**

**Abstract:** Known to a wide circle of specialists of the transport, the concept of "Evacuated Tube Transport Technology" (ET3) [1] is an energy efficient complex magnetic levitation, vacuum and superconducting technology for high-speed ground transportation. The concept is presented as the most effective solution to problem increase the speed and capacity

of the transport system  $c$  is acceptable the cost of moving passengers and cargo, and low cost of energy.

To determine the optimal ranges of working parameters of the considered transportation system the analysis of the characteristics of the rarefied environment. Based on considerations of balance of power the cost of maintaining the vacuum in the system and to overcome aerodynamic drag throughout the speed range of the vehicle (TC) (500÷6500 km/h) it is shown that the lower bound of the optimal depth of vacuum to the vacuum environment, for the vehicle to relatively low speeds, is 25÷80 PA. For vehicles with speeds close to the maximum I would like to have the pressure of 1 PA or less.

**Keywords:** vacuum transport, magnetic levitation transport, vacuum system, sparse environment, aerodynamic characteristics, optimization.

## Введение

Достоинства, недостатки и неоспоримые преимущества высокоскоростных (около 500 км/ч) технологий маглев, реализуемых в естественных условиях окружающей среды, особенно их бóльшая надежность по сравнению с традиционной высокоскоростной рельсовой (ВСР) технологией, достаточно подробно рассмотрены и убедительно обоснованы в работах отечественных и зарубежных исследователей [2, 3].

Но, даже при применении технологии маглев, по мере роста скорости движения ТС квадратично возрастает аэродинамическое сопротивление, и при достигнутых уже сейчас рекордных скоростях движения порядка 617 км/час основная часть возрастающей как куб скорости мощности привода ТС вынужденно затрачивается на его преодоление, также определяя пределы применимости даже и этой более прогрессивной технологии.

Одним из наиболее эффективных решений данной проблемы является использование преимуществ принципиально новой транспортной концепции – «Evacuated tube transport technology» ET3 [1]. Концепт путейпроводов «Evacuated tube transport technology» ET3 или, в переводе, «Вакуумно-трубопроводной транспортной технологии» «ВТЗ» является примером энергоэффективной конвергенции вакуумной и особенно магнитолевитационной и сверхпроводниковой технологий для наземного транспорта, позволяющих ему в потенциале достигать скорости движения ТС более 1000 км/ч, а в перспективе – порядка 6000 км/ч, при высокой пропускной способности магистрального вакуумированного магнитолевитационного путейпровода ET3, приемлемой стоимости перемещения пассажиров и грузов и невысоких затратах энергии в комбинации с новыми перспективными криогенными и низкотемпературными оптоволоконными технологиями.

Основополагающая идея вакуумной транспортной системы указывает на очевидный способ снижения, а в идеале, полного избавления от аэродинамического сопротивления. Теоретически, это дает нам

возможность реализовать, в совокупности с магнитным подвесом ТС, недостижимые до того скорости перемещения наземного транспорта.

Здесь возникает вопрос – насколько глубоким должен быть вакуум в путепроводе? Подавляющее большинство разработчиков проектов вакуумного транспорта рассматривают движение экипажа ТС в путепроводе значительного размера (диаметром более 2,5 м) с глубоким (10 Па и меньше) вакуумом, и с соизмеримыми значительными габаритами ТС. Проблема в таком подходе состоит в том, что на практике все оказывается не так радужно. Считается, что невероятно трудно создать и поддерживать глубокий вакуум в емкостях объемом с комнату, что же можно тогда говорить о трубопроводах длиной сотни и тысячи километров. Транспортный трубопровод будет включать в себя определённую номенклатуру элементов инфраструктуры: множество шлюзов с большим количеством ворот-затворов, определённое количество кранов, фланцев, вспомогательных люков, каналов и т.д.

Кроме того, исследования, проведённые специалистами [1] показали, что кроме пропорционального увеличения потерь энергии на преодоление аэродинамического сопротивления движению ТС, стоимость создания инфраструктуры и самого путепровода также возрастает в третьей степени с ростом его диаметра. Поэтому основным начальным моментом оптимизации вакуумного транспорта является разумная минимизация диаметра самого ТС и вакуумируемого путепровода. По оценке [1] оптимальный диаметр ТС составляет 1300 мм. При значительном отклонении от него «плата», например, за обеспечение повышенного комфорта пассажиров ТС, может стать неоправданно высокой. Поэтому проведенные ниже оценки отнесены к оптимальному диаметру ТС в районе 1300 мм.

Разрабатывая вакуумную транспортную систему чрезвычайно важно на самом начальном этапе определиться с требованиями к необходимой и достаточной степени разрежения в транспортном тоннеле. Основным критерием разумно принять баланс требуемых затрат энергии на создание и поддержание вакуума и энергии на преодоление аэродинамического сопротивления. Кроме того, важно учитывать стоимость оборудования необходимого для создания вакуума требуемой величины и непрерывной компенсации возможного натекания.

### **Затраты энергии на поддержание вакуума в транспортном тоннеле**

Натекание газа через стенки вакуумной системы, сварные швы, уплотнения в местах соединений, а также газоотделение (десорбция) неизбежны и присущи всякой вакуумной системе.

Абсолютная величина натекания  $A$ , установившегося в реальной вакуумной системе, при неизменных заданных параметрах, не зависит от времени. В теории и практике вакуумной техники значение этой величины, обычно, определяют по формуле [4]:

$$A = \frac{dQ}{dt} = V \cdot \frac{\Delta P}{\Delta t} = const,$$

где  $A$  – поток газа, натекающего в систему через неплотности, л·Па/с;  
 $Q$  – количество натекающего газа, л·Па;  
 $V$  – объем вакуумной системы, л;  
 $\Delta P$  – изменение давления в системе за время  $\Delta t$ , Па;  
 $\Delta t$  – длительность натекания, с.

При проектировании вакуумного трубопровода необходимо задаться величиной допустимого натекания воздуха внутрь. Очевидно, что чем выше требования к допустимому уровню натекания, тем выше стоимость системы обеспечения и поддержания вакуума.

Очень сложно спрогнозировать возможный уровень натекания в тоннеле вакуумной транспортной системы, так как аналогов таких вакуумных сооружений (объемом сотни тысяч кубометров) нет. Поэтому на этапе предварительного анализа рабочих параметров вакуумной транспортной системы, в качестве первого приближения, можно обратиться к опыту создания *серийных технологических (не экспериментальных)* вакуумных установок, объем которых обычно не превышает 20 кубометров [4].

На основе практического анализа большого количества реальных вакуумных систем, экстраполяцией, определена область существования значений натекания  $A$ , отражающая действительные возможности обеспечения герметичности вакуумных систем промышленных установок (рис. 1).

На рис.1 представлена область существования величин натекания в зависимости от объема вакуумной системы. Ниже прямой 1 находится область натеканий, обусловленных весьма малыми значениями негерметичности, достижение которых приводит к нерациональному расходу средств и времени. Область, расположенная выше прямой 2 – область значительных натеканий, ведущих к увеличению энергозатрат на поддержание нужного давления в системе и нежелательной неравномерности параметров по объему системы. Вертикальная пунктирная линия соответствует объему вакуумного трубопровода диаметром 2 м и длиной 1000 м ( $V=3141 \text{ м}^3$ ).

На рис. 2 представлена область допустимых величин расходов  $Q$  натекания воздуха в зависимости от объема вакуумной системы. Горизонтальными пунктирными линиями обозначены уровни эквивалентные натеканию через отверстия диаметром 1мм ( $Q=0,184 \text{ гр/с}$ ) и 1,5 мм ( $Q=0,415 \text{ гр/с}$ ).

Опираясь на предложенную экстраполяцию, для участка вакуумного путепровода длиной 1 км и диаметром 2 м, принимаем характерный уровень натекания  $A=16 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ , равный наименьшему  $A_{min}$  для данного объема системы. Такой уровень натекания соответствует расходу воздуха  $Q=0,2 \text{ гр}/\text{с}$ , втекающего через негерметичности, суммарная площадь которых эквивалентна отверстию диаметром 1,05 мм.

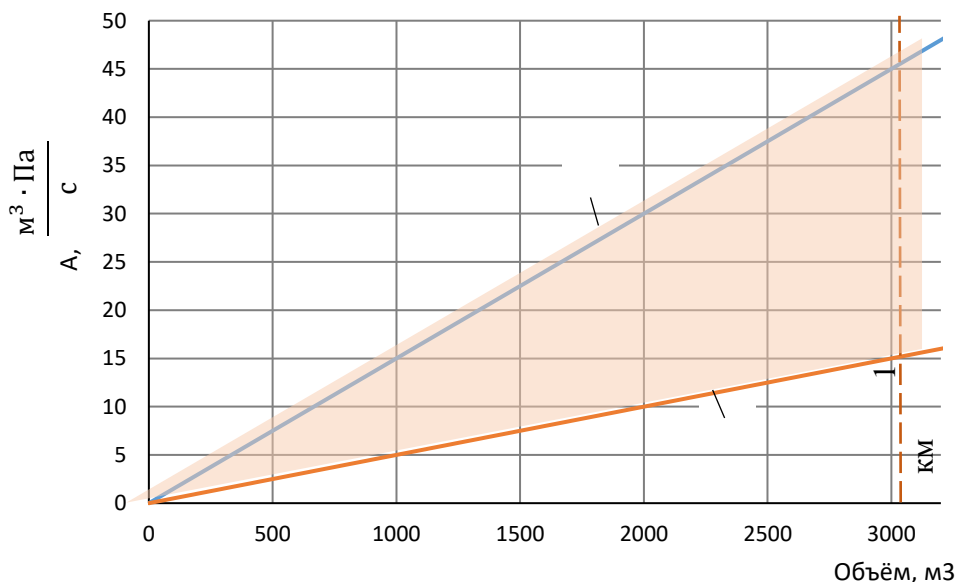


Рис. 1. Поле существования величины натекания.

1 – граница наименьшего натекания; 2 – граница максимального натекания

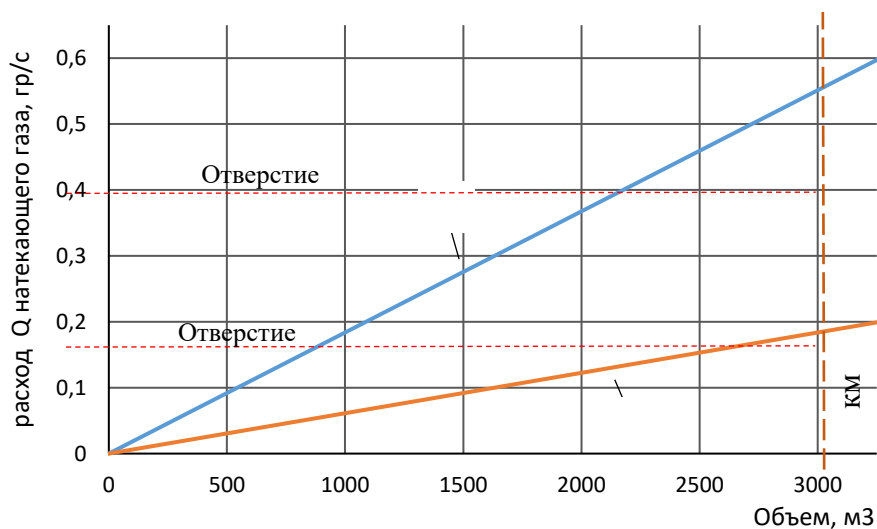


Рис. 2. Поле допустимых расходов натекания воздуха.

1 – граница наименьшего натекания; 2 – граница максимального натекания

На рис. 3 представлено сравнение «производительности» отверстия диаметром 1,05 мм и производительности известных моделей вакуумных установок (2 – насос НВЗ-500, 3 - вакуумная установка УВП 5000/600, 4 – трехступенчатая вакуумная насосная установка ЕТЗS).

Из данного сравнения очевиден вывод – при заданном уровне натекания на **одном километре** вакуумного путепровода:

- один постоянно работающий насос НВЗ-500 может обеспечить вакуум в тоннеле менее 40 Па;
- одна постоянно работающая вакуумная установка УВП 5000/600 может обеспечить вакуум в тоннеле менее 5 Па;
- одна постоянно работающая вакуумная насосная установка ET3S может обеспечить вакуум в тоннеле менее 2 Па.

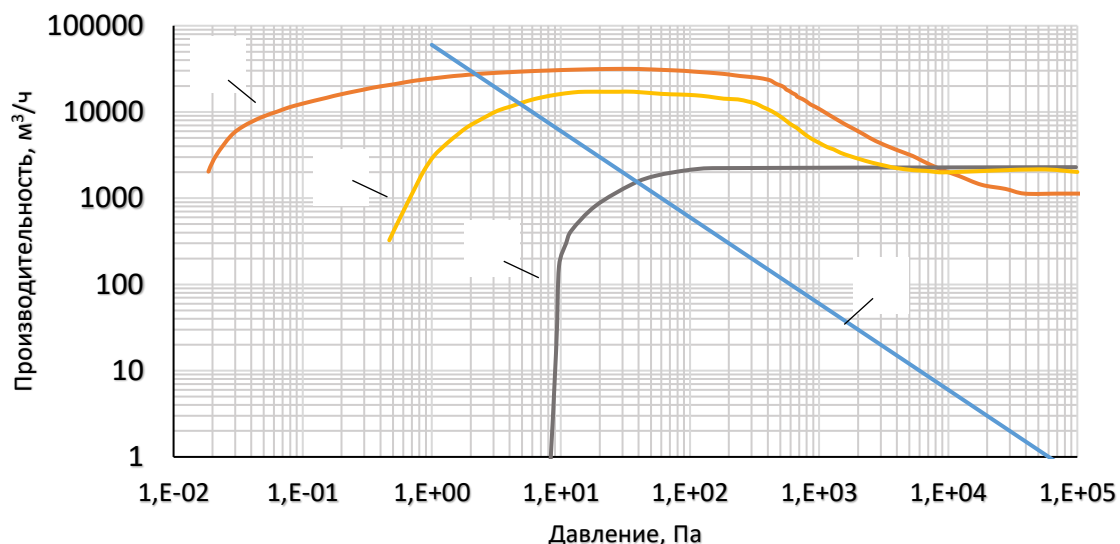


Рис. 3. Сравнение «производительности» отверстия диаметром 1,05 мм и производительности известных моделей вакуумных насосов (1 – отверстие Ø1,05 мм, 2 – насос НВЗ-500, 3 - вакуумная установка УВП 5000/600, 4 – трехступенчатая вакуумная насосная установка ET3S)

В таблице 1 представлена информация о необходимом количестве насосных установок на 1000 км вакуумной трассы для поддержания требуемого давления вакуумирования.

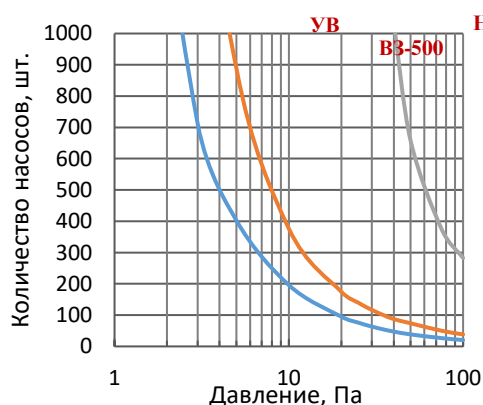


Рис.4. Количество насосов необходимое для поддержания требуемого вакуума в канале (Ø 2м) длиной 1000 км

Таблица 1

Давление, Па,	Количество насосов на 1000 км, шт.		
	ET3S	УВП 5000/600	НВЗ-500
1	2464	19241	-
3	711	1923	-
5	403	890	-
10	196	377	36698
20	95	175	3672
25	76	140	2938
30	63	117	1373
35	54	100	1177
40	47	87	1030
50	38	74	657
100	20	38	283
200	11	21	131

Выполним оценку удельной (на километр путепровода) мощности, требуемой для поддержания заданного уровня давления.

Мощность, потребляемая насосами, затрачивается на преодоление трения в механизме насоса (мощность трения или мощность потерь) и на процесс перемещения и сжатия газа (индикаторная мощность). В области низких давлений (ниже 103 Па) потребляемая насосом мощность практически остается постоянной и не зависит от давления на впуске. Эта постоянная мощность в области низких давлений и является мощностью потерь [5]. Характерные зависимости потребляемой мощности насосами разных типов от давления представлены на рис. 5 - 7.

Для механических плунжерных насосов и двухроторных насосов типа Рутс мощность потерь находится на уровне 10-25% от номинальной мощности привода. Потребляемая мощность винтовых насосов во всем рабочем диапазоне давлений остается постоянной и близка к мощности привода [6]. Опираясь на известные характеристики насосов определимся с необходимыми мощностями вакуумной системы.

На рис. 8 представлены зависимости удельной мощности потребляемой насосными станциями для поддержания требуемого давления в вакуумной системе.

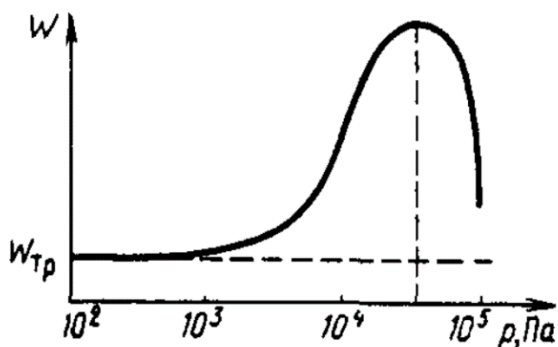
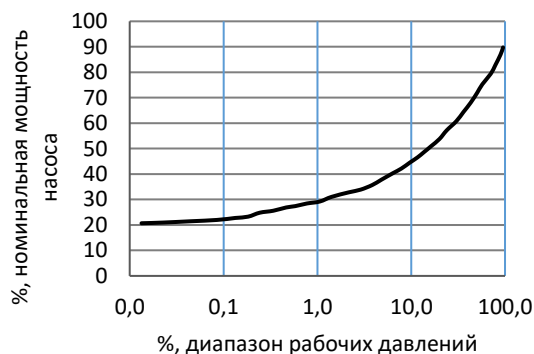


Рис. 5. Типичная зависимость мощности от давления потребляемой плунжерным форвакуумным насосом [5]



б

Рис. 6. Типичная зависимость мощности от давления потребляемой высоковакуумным двухроторным насосом [6]

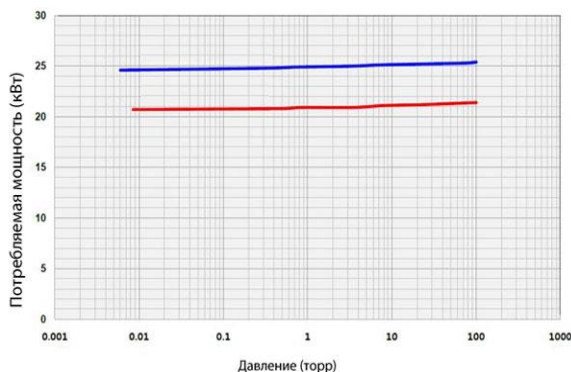


Рис. 7. Типичная зависимость мощности от давления потребляемой винтовым вакуумным насосом [7]

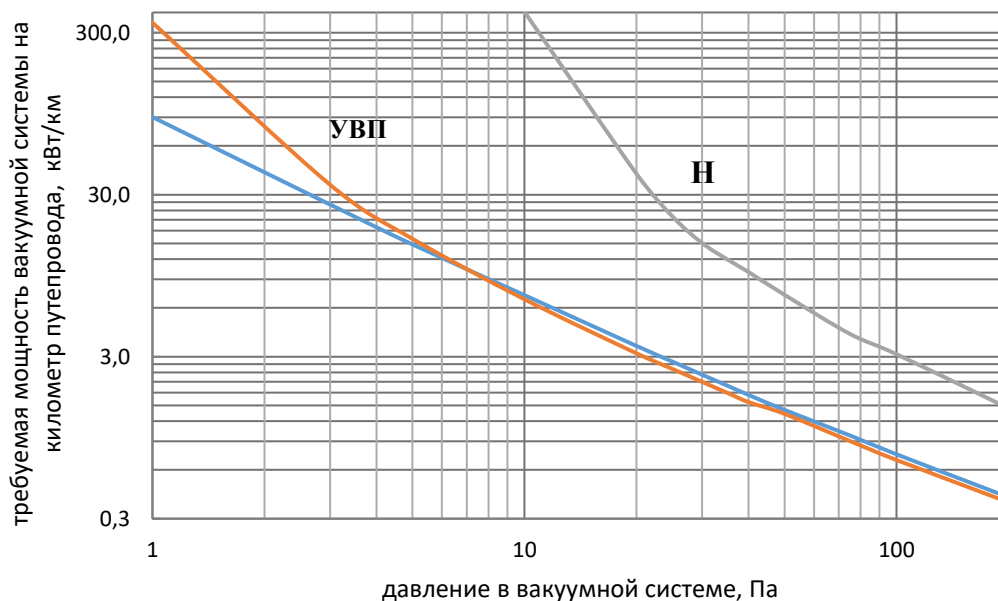


Рис. 8. Мощность, потребляемая насосными станциями для поддержания заданного давления в тоннеле длиной один километр (при натекании через отверстие  $\varnothing 1,05$  мм).

### **Затраты энергии на преодоление аэродинамического сопротивления транспортного средства**

Как должно выглядеть оптимальное транспортное средство для вакуумного транспорта? На данный момент, даже при использовании уже существующих сейчас традиционных технических решений, этот вопрос далек от окончательного ответа. И только по мере постепенного более полного проникновения в суть идеи будут возникать новые эффективные и нетрадиционные технические решения, будет формироваться облик и геометрические размеры ТС ВМЛТ. Формируя внешний вид, а значит и аэродинамические качества ТС, определяющую роль будут играть такие параметры как маршевая скорость транспортного средства, его форма и размеры, степень разреженности и, возможно, состав и способ организации среды, вид и геометрические характеристики подвески (системы левитации) и др.

Так, например, при относительно невысокой скорости ТС. порядка 650 км/час., вклад в суммарные потери кинетической энергии ТС от аэродинамического сопротивления, соизмерим с потерями энергии на разгон и торможение ТС, а при скоростях, близких к верхней границе диапазона, при соответствующем более высоком оптимальном рабочем вакууме и транспортной эффективности порядка  $5 \cdot 10^4$  с, определяющими могут стать уже иные составляющие, например, потери энергии на разгон и торможение ТС [12].



Аэродинамика тела движущегося в потоке воздуха ограниченного стенками канала подобна аэродинамике воздухозаборного устройства проточного двигателя летательного аппарата, захватывающего и пропускающего через себя поток воздуха. По аналогии, необходимо рассматривать тот же комплекс проблем и задач, что возникает при проектировании многорежимного воздухозаборника силовой установки высокоскоростного летательного аппарата во всем диапазоне принятых условий:

- «запуск» проточного тракта между капсулой и стенкой канала, что подразумевает полное перетекание газа из носовой части в кормовую;
- минимизация лобового (волнового) сопротивления;
- снижение сопротивления трения как следствия развитого пограничного слоя на стенках капсулы и его взаимодействия с падающими и отраженными ударными волнами;
- минимизация донного сопротивления;
- минимизация аэродинамического нагрева обтекаемых поверхностей.

К перечисленным задачам можно добавить вопросы:

- изучения динамики движения капсулы (устойчивость, перегрузки при маневрах и др.).
- изучения пассивных (аэродинамические рули, стабилизаторы и др.) и активных (газодинамические рули и др.) методов стабилизации и управления капсулой;

Оценочные расчеты диапазона аэродинамических нагрузок выполнены для упрощенной геометрии капсулы (конус+цилиндр+конус, см. рис. 10).

Исследование аэродинамических характеристик капсулы выбранной геометрии выполнены [11] с помощью коммерческого комплексного программного продукта SolidWorks+ANSYS. Подготовка 3D-модели осуществлялась в программе SolidWorks, затем модель импортировалась в вычислительном модуль ANSYS, где производился газодинамический расчет. Указанный вычислительный пакет при решении задач использует метод конечных объемов и нестационарные уравнения Навье-Стокса. Программа автоматически анализирует геометрию тела и формирует расчетную сетку на поверхности тела и в выделяемой области вычисления. В процессе решения в зонах больших градиентов сетка автоматически оптимизируется. При выполнении расчетов учитываются реальные свойства газа, вязкость, наличие пограничных ламинарного и турбулентного ( $k-\epsilon$  модель) слоев на стенках капсулы и др.

Перед проведением серии численных исследований аэродинамики капсулы выполнено обоснование правомерности расчетов прикладным

пакетом на основе решения системы уравнений Навье-Стокса на предмет сплошности исследуемой среды.

Критерием сплошности (разреженности) газовой среды является Число Кнудсена.

$$K = \frac{l}{d} = \frac{\text{длина среднего свободного пробега}}{\text{параметр, характеризующий размеры тела}}$$

При малых числах Рейнольдса в качестве параметра  $d$ , характеризующего размеры тела, можно взять длину тела  $L$ . В этом случае число Кнудсена рассчитывают на основе данных о длине:

$$K_L = \frac{1,26\sqrt{\gamma}M}{Re} \approx 1,5 M/Re [9].$$

На рис. 9 представлены оценки числа Кнудсена для рассматриваемой геометрии капсулы, в диапазоне скоростей полета  $V=1000 \div 6500$  км/ч, давлений  $P_{\text{вак}}=1 \div 1000$  Па.

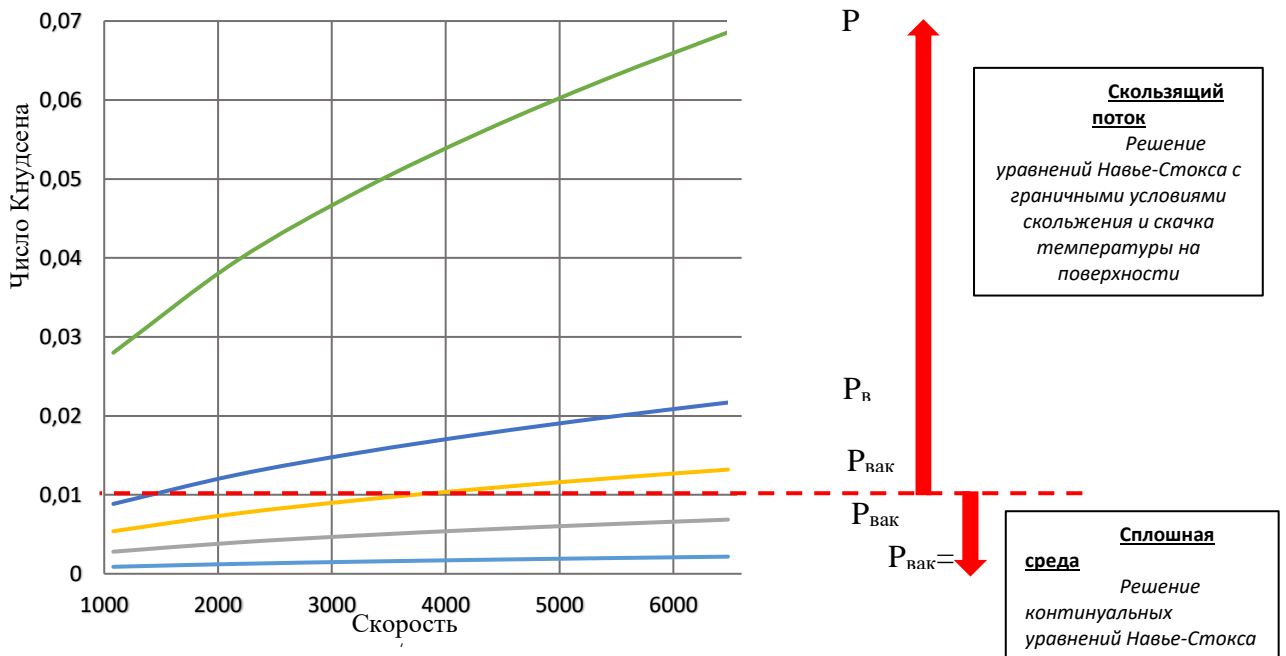


Рис. 9. Числа Кнудсена вычисленные для условий конкретной задачи

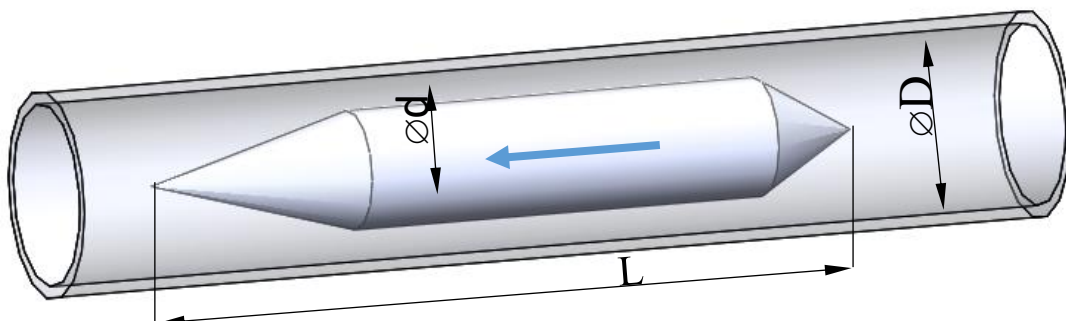


Рис. 10. Геометрия модели капсулы в канале

Изучая аэродинамические характеристики капсулы, нельзя рассматривать её отдельно от канала, игнорируя вопросы интерференции. Полет тела в свободном потоке и в условиях ограниченных стенками канала в общем случае не идентичны. Картина обтекания капсулы в свободном

полете со сверхзвуковой скоростью ( $V=6500$  км/ч, число  $M=5.4$ ,  $P=100$  Па,  $T=300$  К) представлена на рис. 11.

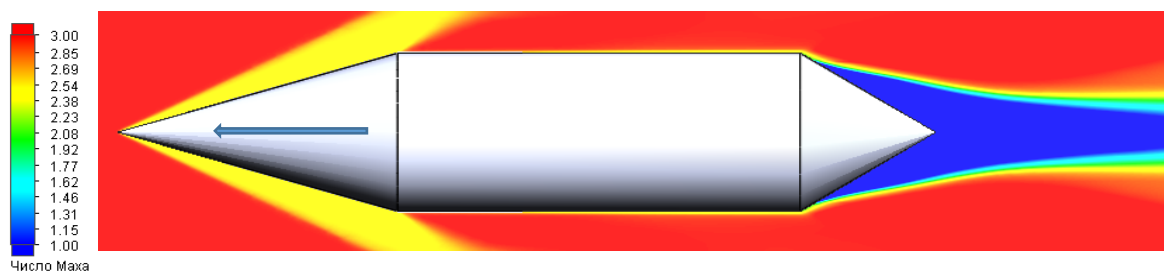


Рис. 11. Полет капсулы в свободном потоке

Основной вклад в сопротивление вносит волновое сопротивление капсулы. Существенно меньший вклад дают донное давление и сопротивление трения на стенках капсулы.

В случае движения капсулы в канале могут реализоваться два принципиально разных варианта газодинамического течения. Здесь важным параметром является соотношение площадей капсулы и канала:  $\theta = \frac{S_D}{S_d}$ , где  $S_D$  – площадь канала,  $S_d$  – площадь капсулы. При некотором  $\theta_{\text{крит}}$  (критическое соотношение площадей) происходит перестройка течения.

В первом, благоприятном случае ( $\theta > \theta_{\text{крит}}$ ), зазора между внутренней стенкой канала и стенкой капсулы достаточно, чтобы «проглотить» весь захватываемый капсулой воздух (рис. 12). В этом случае, общее сопротивление капсулы (см. рис. 14 кривые 2 и 3) может быть даже несколько ниже чем в свободном полете благодаря большему давлению в кормовой части капсулы (результат интерференции капсулы и канала).

Второй вариант реализации течения (рис. 13) неблагоприятен с точки зрения аэротермодинамических характеристик.

Зазор между каналом и капсулой столь узок ( $\theta < \theta_{\text{крит}}$ ), что весь захватываемый газ не «проглатывается». Формируется течение несколько схожее с движением полупроницаемого поршня в трубе. Капсула толкает большую часть газа впереди себя. Формируется ударная волна, распространяющаяся впереди капсулы. Сопротивление тела резко возрастает (см. рис. 14 кривая № 1).

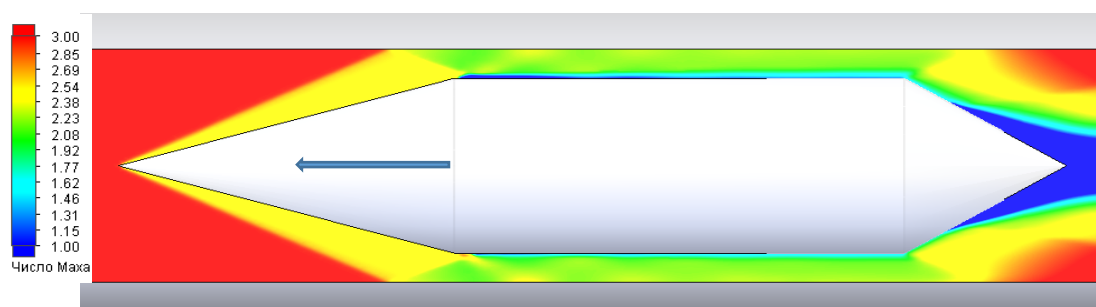


Рис. 12. Оптимальный вариант работы системы «капсула-канал» («расчетный» режим)

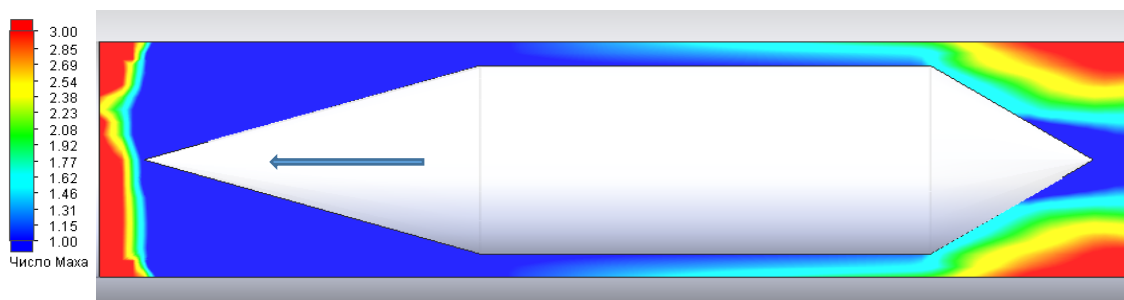


Рис. 13. Неблагоприятная картина течения («нерасчетный» режим)

На рис. 14 представлены результирующие численные исследования графики, характеризующие зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления капсулы выбранной геометрии от скорости движения. При выполнении серии расчетов рассматривались три варианта внутреннего диаметра канала ( $\varnothing = 1500$  мм (1),  $\varnothing = 1750$  мм (2),  $\varnothing = 2000$  мм (3)), наружный диаметр капсулы принят неизменным ( $\varnothing = 1300$  мм).

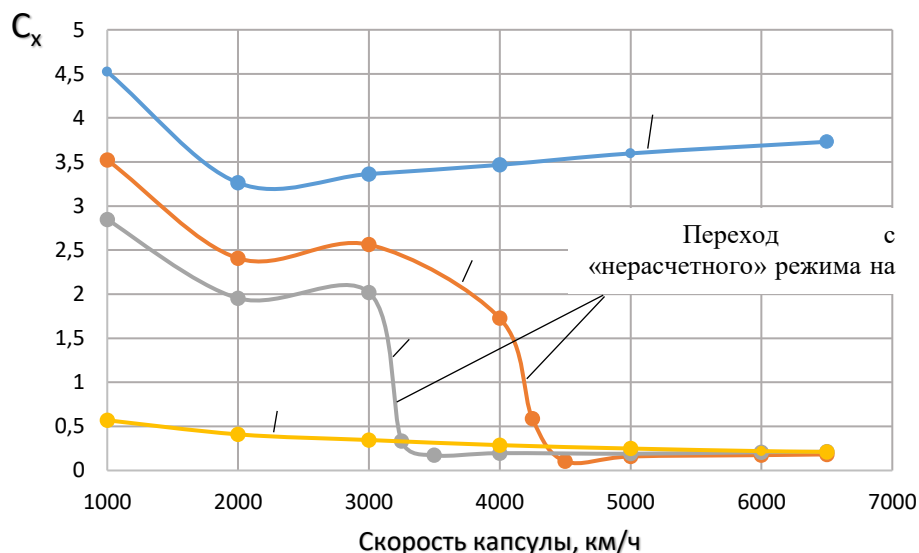


Рис. 14. Коэффициент аэродинамического сопротивления капсулы.

1 – диаметр канала 1500 мм, 2 - диаметр канала 1750 мм,  
3 - диаметр канала 2000 мм, 4 – капсула в свободном полете (диаметр канала =  $\infty$ )

Мощность необходимую на преодоления аэродинамического сопротивления, при использовании существующих традиционных технических решений, вычисляем из условия постоянства скорости движения капсулы на маршевом участке пути. Рассматриваем наиболее благоприятный, для всего диапазона скоростей, случай с минимальными энергозатратами (случай 4 (рис. 14)).

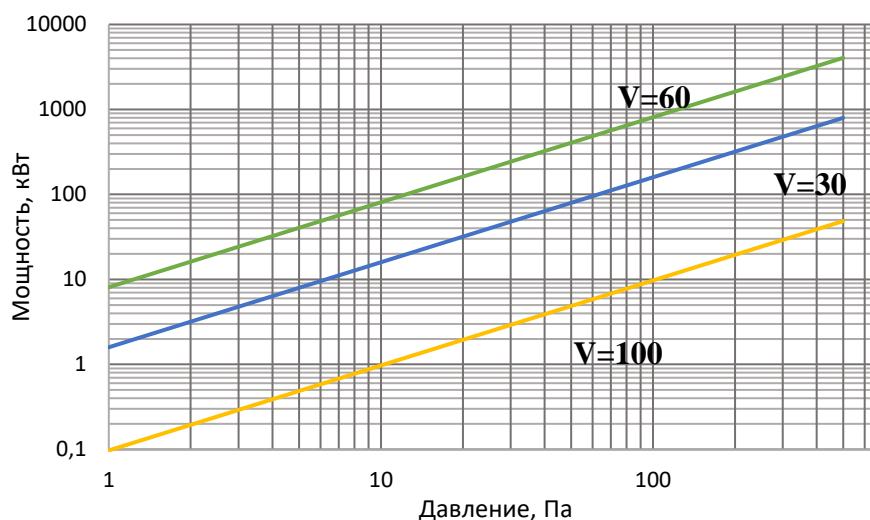


Рис. 15. Мощность, затрачиваемая приводом одной транспортной капсулы на преодоление аэродинамического сопротивления.

На рис. 15, для трех скоростей движения (1000, 3000 и 6000 км/ч), представлены зависимости мощности требуемой для преодоления транспортной капсулой аэродинамического сопротивления от давления в транспортной системе.

Для сопоставления мощности требуемой на преодоление аэродинамического сопротивления и удельной мощности потребляемой насосными станциями для поддержания требуемого давления в вакуумной системе необходимо введение понятия удельной, на километр путепровода, мощности преодоление аэродинамического сопротивления. Определяющим параметром при этом становится отношение всего количества транспортных капсул, двигающихся одновременно в тоннеле, к общей длине путепровода (плотность капсул, «загруженность» вакуумной трассы, штук капсул/км). Другими словами, то количество транспортных капсул которое в рассматриваемый момент времени обслуживает вакуумная система. В пределе, для одной транспортной капсулы нет смысла организовывать сложную и дорогую вакуумную систему, потребляющую много больше энергии, чем затраты на преодоление аэродинамических сил.

На данном этапе развития и степени проработки концепции вакуумного транспорта трудно судить о технических возможностях периодичности и дистанции следования капсул друг за другом по одному путепроводу. Большинство авторов работ о вакуумном транспорте, вполне резонно, этот вопрос не затрагивают. Редкие работы, в которых приводятся предполагаемые пропускные способности системы, как правило, стараясь представить традиционную вакуумную транспортную технологию в крайне выгодном свете демонстрируют существенно завышенные возможности (от 2 до 200 капсул в минуту).

Выполним оценку возможных диапазонов временной периодичности и диапазонов следования капсул, например, традиционных систем, друг за другом исходя из умозраительной экстренной ситуации. Пусть капсула №2 следует за капсулой №1. Представим, что в точке А по пути следования с капсулой №1 случается авария, Определим время и расстояние необходимое для экстремального торможения капсулы №2, прежде чем она окажется в точке А.

В соответствии с указаниями ГОСТ Р 53130-2008 пассажир зафиксированный в кресле способен длительное время (более 5 секунд) выдержать воздействие перегрузки равное  $a = -2g$  (рис. 16).



Рис. 16. Длительность предельно допустимых линейных ускорений  $-a_x(g)$  "дья-спина" для пассажира, зафиксированного в кресле в позе "сидя" (кривые 1, 2) или в позе "лежа" (кривая 3), при единичном воздействии импульса [8]

Опираясь на выражения (2), времени торможения и пути для равнозамедленного движения, выполним оценки минимально возможных значений дистанции в зависимости от маршевой скорости капсулы.

$$\text{Время торможения (с): } t = \frac{v_{\text{марш}}}{a};$$

$$\text{Дистанция торможения (м): } L = \frac{a \cdot t^2}{2}. \quad (2)$$

В таблице 2 представлены результаты расчета минимальных значений периода и дистанции следования транспортных капсул, а также удельное значение количества капсул на 1000 километров пути.

Таблица 2

Маршевая скорость ( $v_{\text{марш}}$ ), км/ч	Время торможения, с	Дистанция торможения, км	Плотность капсул, штук на 1000 км
1000	14,2	2	508
2000	28,3	7,9	127
3000	42,5	17,7	56
4000	56,7	31,5	32
5000	70,9	49	20
6000	85,0	70,9	14

Основываясь на выполненных оценках, можно определить удельные, на километр путепровода, мощности преодоления аэродинамического сопротивления (рис.17) и выполнить сравнение с удельной мощностью потребляемой вакуумными насосными станциями для поддержания требуемого давления в вакуумной системе.

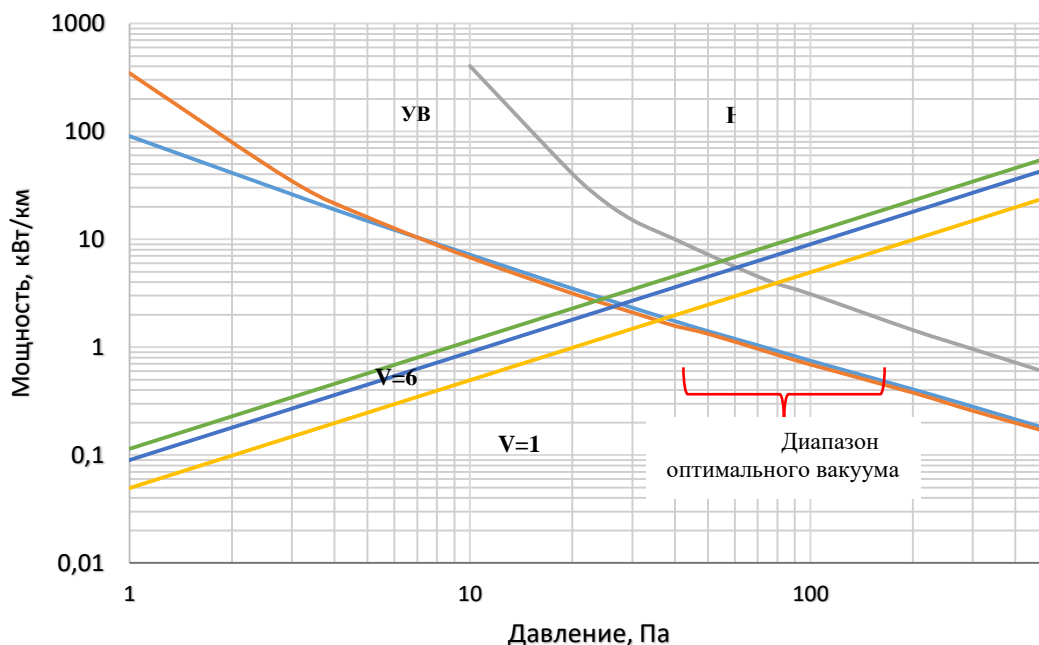


Рис. 17. Сравнение удельных мощностей, затрачиваемых на преодоление аэродинамического сопротивления и поддержания заданного давления в тоннеле.

Область пересечения диаграмм мощностей на рис. 17 указывает нижнюю границу оптимальной глубины разрежения в вакуумной системе при эксплуатации вакуумного транспорта.

Рис. 17 построен для количества капсул, показанных в табл. 2. Уменьшение (увеличение) количества капсул ведёт к уменьшению потребной мощности на преодоление аэродинамического сопротивления и смещает диапазон оптимального вакуума в сторону больших значений давления (и наоборот).

## Выводы

1. Нижняя граница области оптимальных значений эксплуатационных давлений в тоннеле вакуумной транспортной системы, при использовании существующих традиционных технических решений, лежит в диапазоне 25÷80 Па.

2. Плотность капсул в вакуумном тоннеле, при использовании существующих традиционных технических решений, является определяющим параметром, влияющим на величину оптимального давления эксплуатации вакуумного транспорта. Чем больше плотность

капсул, тем ниже граница по давлению. И наоборот, чем меньше транспортных капсул в пути, тем большее давление является энергетически и экономически обоснованным.

3. Для повышения общей транспортной эффективности вакуумного транспорта необходимо проведение комплексной оптимизации её параметров в каждом конкретном случае на основе новых, и нетрадиционных технических решений. Подобная оптимизация может быть успешно проведена при предложенных методических подходах с помощью используемых и описанных в статье программно-технических комплексов.

### Библиографический список

1. ET3 online education / The website of the Evacuated Tube Transport Technology. [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://et3.eu/et3-online-education.html> (дата обращения 27.08.2016).

2. Зайцев А. А. Транспорт на магнитном подвесе / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова; под ред. А. А. Зайцева. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 160 с.

3. Technical-economical comparison of Maglev and High Speed Systems / The website of the Transportation and Infrastructure Committee [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://archives.republicans.transportation.house.gov/Media/File/110th/Rail/3-20-07-roundtable-Brady-dornier.pdf> (дата обращения: 27.08.2016).

4. Горлатов А. С. Оценка вакуумных установок на натекание воздуха через неплотности. // Технол. процессы и оборуд. рыбообработывающих предприятий: Сб. науч. тр. КТИРПХ. – Калининград, 1982. – Вып. 98. – С. 44-51.

5. Розанов Л. Н. Вакуумная техника: Учеб. для вузов по спец. «Вакуумная техника». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 320 с.

6. Стенд для снятия характеристик вакуумных насосов / Сайт ООО НПП "СПЛАВ" [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://vacuumsplav.ru/> (дата обращения 31.08.2016).

7. Винтовые вакуумные насосы SVC / Сайт ООО «Вактрон» [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://techeiscatel.ru/> (дата обращения 31.08.2016).

8. ГОСТ Р 53130-2008. «Безопасность аттракционов. Общие требования», – Москва : Стандартинформ, 2009. – 131 с.

9. Справочник по системотехнике / под ред. Р. Макола, перевод с английского под ред. А. В. Шилейко. – М: Советское радио, 1970. – 688 с.

10. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. – М., Транспорт. 1987. – 479 с.



11. Терентьев Ю. А. К вопросу выбора диапазона рабочих параметров вакуумного магнитолевитационного транспорта / Ю. А. Терентьев, В. М. Фомин, Д. Г. Наливайченко // XI международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, КВЦ «Сокольники», 12-14 апреля, 2016.

12. Терентьев Ю. А. Вакуумный магнитолевитационный транспорт по технологии ET3 «Evacuated Tube Transport Technologies» - новые горизонты транспортной эффективности. // Сб. докладов Международной научно-практической конференции «Транспортные системы: тенденции развития», Москва, МИИТ, 26 - 27 сентября, 2016. (в печати)

## References

1. ET3 online education. URL: <http://et3.eu/et3-online-education.html> (27.08.2016).

2. Zaitsev A. A., Talashkin G. N & Sokolova Y. V. *Transport na magnetnom podvese* [Transport magnetic suspension]. St. Petersburg, 2010. 160 p.

3. *Technical-economical comparison of Maglev and High Speed Systems* URL: <http://archives.republicans.transportation.house.gov/Media/File/110th/Rail/3-20-07-roundtable-Brady-dornier.pdf> (27.08.2016).

4. Gorlatov A. S. *Tehnol. processy i oborud. ryboobrabatyvajushhih predpriyatij: Sb. nauch. tr. KTIRPH – Technological processes and equipment, processing facilities: Collection of scientific papers KTI*, Kaliningrad, 1982, vol. 98, pp. 44–51.

5. Rozanov L. N. *Vakuumnaja tehnika: Ucheb. dlja vuzov po spec. "Vakuumnaja tehnika"* [Vacuum Technology: Proc. for by special institutions. "Vacuum Technology"]. Moscow, 1990. 320 p.

6. *Stand dlja snjatija harakteristik vakuumnyh nasosov* (Stand for the characterization of vacuum pumps). URL: <http://vacuumsplav.ru/> (31.08.2016).

7. *Vintovye vakuumnye nasosy SVC* [Screw vacuum pumps SVC]. URL: <http://techeiscatel.ru/> (31.08.2016).

8. GOST R 53130-2008. Safety of attractions.

9. Mac'ol R. *Spravochnik po sistemotehnike* [Handbook of systems engineering]. Moscow, 1970. 688 p.

10. Schahunjanz G. M. *Zheleznodorozhnyj put'* [Railway track]. Moscow, 1987. 479 p.

11. Fomin V. M., Zvegintsev V. I., Nalivaichenko D. G. & Terent'ev Y. A. K voprosu vybora diapazona rabochih parametrov vakuumnogo magnitolevitacionnogo transporta [To the question of the choice of range of operating parameters of the vacuum magnetic levitation transport] *XI mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "Vakuumnaja tehnika,*

*materialy i tehnologija*” (XI international scientific and technical conference "Vacuum equipment, materials and technology"). Moscow, 2016.

12. Terent’ev Y. A. Vakuumnyj magnitolevitacionnyj transport po tehnologii ET3 “Evacuated Tube Transport Technologies” - novye gorizonty transportnoj jeffektivnosti [Vacuum magnetic levitation transport technology ET3 "Evacuated Tube Transport Technologies - new horizons of transport efficiency] *Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija “Transportnye sistemy: tendencii razvitija”* (International scientific-practical conference "the Transport system: development trends"). Moscow, 2016.

**Сведения об авторах:**

ФОМИН Василий Михайлович, доктор физико-математических наук, академик РАН, научный консультант Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

E-mail: fomin@itam.nsc.ru

ЗВЕГИНЦЕВ Валерий Иванович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

E-mail: zvegin@itam.nsc.ru

НАЛИВАЙЧЕНКО Денис Геннадьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

E-mail: denis@itam.nsc.ru

ТЕРЕНТЬЕВ Юрий Алексеевич, независимый эксперт, официальный представитель «Evacuated tube transport technology» (ET3) в России

E-mail: teren\_y@mail.ru

**Information about authors:**

Vasily M. FOMIN, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Member of the Russian Academy of Science, scientific consultant of the Institute, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

E-mail: fomin@itam.nsc.ru

Valery I. ZVEGINTSEV, Doctor of Engineering Sciences, chief scientific officer, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

E-mail: zvegin@itam.nsc.ru

Denis G. NALIVAICHENKO, Candidate of Engineering Sciences, researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

E-mail: denis@itam.nsc.ru

Yuriy A. TERENCEV, Independent expert, official representative of the “Evacuated tube transport technology” (ET3) in Russia

E-mail: teren\_y@mail.ru