

## О научном обосновании технико-технологических требований к вакуумно-левитационной транспортной системе (ВЛТС)

*Р.О. Кондратенко, С.Б. Нестеров, \*А.Н. Белоконев, А.И. Холопки*  
Москва, ОАО «НИИВТ им.С.А. Векшинского», Нагорный проезд, 7, E-mail: [rim19@mail.ru](mailto:rim19@mail.ru)  
\*Москва, РКК «Энергия»

*В статье приводится обоснование технико-технологических требований к вакуумно-левитационной транспортной системе (ВЛТС) на основе рассмотрения габаритных размеров поезда и вакуумного трубопровода, скорости поезда, характеристик вакуумной среды и энергетических затрат на ее создание, характеристик системы жизнеобеспечения и кондиционирования. Приводится строительная ячейка магистрали ВЛТС. Приводятся результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния секции вакуумного трубопровода с учетом гравитации.*

*Scientific basis of technical requirements for vacuum levitation transportation system (VLTS). R.O. Kondratenko, S.B.Nesterov, A.N.Belokonyev, A.I.Holopkin. Technical requirements for VLTS are explained scientifically. Overall dimensions of train and vacuum tubing, train speed, vacuum medium features and energy expenses for its creation, life provision and conditioning system are viewed. A building cell of VLTS main line is presented. Results of computational modeling of the vacuum tubing stress-strain state are given. Gravitation conditions are considered.*

### 1. Скорость вакуумного поезда.

Рабочая скорость вакуумного поезда определяется согласно экономическим требованиям к современным конкурентоспособным перевозкам людей и грузов, и может отличаться в зависимости от ниши использования ВЛТС.

Однако, с научной точки зрения, рабочая скорость должна быть либо ниже скорости звука, либо выше ее, поскольку при околозвуковых скоростях начинается волновой кризис, сопровождающийся ростом лобового сопротивления, появлением вибраций и др. (эти скорости зависят от аэродинамических характеристик поезда и от степени разрежения в вакуумном трубопроводе).

При давлении в вакуумном трубопроводе  $P=10$  Па скорость звука будет составлять около 1000 км/ч, что существенно меньше, чем при 1 атм. (1224 км/ч), в частности, из-за отсутствия паров воды.

Из этих соображений можно выделить две ВЛТС, имеющие существенные различия:

- **Дозвуковая ВЛТС** (до 1000 км/ч). Требуется меньших вложений, рабочая скорость будет сопоставима со скоростью гражданской авиации (800-900 км/ч).
- **Сверхзвуковая ВЛТС** (>1000 км/ч). Переход с дозвуковой скорости на сверхзвуковую должен выполняться настолько возможно быстрее, возможно, с использованием «форсажа» двигателя, как в авиации, чтобы избежать длительной поездки в зоне волнового кризиса. Такой вариант исполнения потребует больших вложений как в устройство поезда, так и в устройство вакуумного трубопровода.

### 2. Характеристики вакуумной среды и энергетические затраты на ее создание и поддержание. Габариты ВЛТС.

Процесс выбора оптимального давления в трубопроводе для вакуумно-левитационного транспорта связан со многими факторами.

Главный из них, требующий снижения давления, связан с уменьшением энергозатрат на преодоление лобового сопротивления при увеличении скорости до 1000 км/ч.

Авторы проекта Hyperloop (США, 2013-по наст. время) предлагают брать давление 99 Па [1], авторы проекта MEL (США, 1972-1981) предлагали принять давление внутри трубопровода равным 101 Па [2], авторы проекта ET3 (США, Китай, 1997-по наст. время) [3] предлагают принять давление внутри трубопровода 1000 Па, авторы проекта «Вакуумно-левитационный транспорт» [4, 5] рассчитывают транспортную систему при давлении от 1 до

100 Па, авторы патента High speed transport system (США, 1991) [6] предлагали давление от 1 до 1000 Па.

Натурные испытания по движению капсулы в вакуумном трубопроводе с помощью магнитной левитации проводились профессором Вейнбергом Б.П. (Россия, 1913) [7], а также профессором Ozawa К. (Япония, 1970) [8], который использовал для движения ракетный двигатель. Проводятся опыты в Китае (Доктор Денг Зиганг, лаборатория по прикладной сверхпроводимости в Юго-восточном транспортном университете Дзяо Тонг) [9], а также планируются опыты в США (проект Hyperloop) и, возможно, в России (проект вакуумно-левитационный транспорт).

Однако пока все опыты не дают информации по оптимизации характеристик вакуумной среды.

Как видно из анализа, с научной точки зрения оптимальное давление еще не найдено и варьируется от 1 до 1000 Па.

Вакуумная среда может оказывать разнообразные воздействия, как на вакуумный трубопровод, так и на материалы, узлы и блоки приборов, находящиеся вне гермоотсеков вакуумно-левитационного поезда.

Так как эти приборы будут представлять собой сложные электронные и электрические устройства, даже знание детальных вакуумных характеристик их составных частей не позволит с высокой степенью надежности аналитически оценить те или иные особенности их поведения при эксплуатации. Единственным приемлемым способом являются тщательные исследования и испытания всех систем в специальных установках, моделирующих воздействия, процессы и явления в вакуумной среде.

Процессы и явления, влияющие на выбор характеристик вакуумной среды для вакуумно-левитационного поезда представлены в Таблице 1).

Таблица 1. Процессы и физические явления в вакууме

<b>Процесс или явление</b>	<b>Степень влияния процесса</b>	<b>Ориентировочное давление для исследования процесса</b>	<b>Способ нейтрализации явления, решение проблемы</b>
1. Перепад давлений и его влияние на механическую прочность герметичных корпусов вакуумного поезда а также его защитной оболочки	Чем больше перепад давлений, тем больше влияние на механическую прочность герметичных корпусов, полостей, пустот	$\sim 10^3$ Па	Проблема разрешима. Разгерметизация защитной оболочки через калиброванные отверстия путем выравнивания давлений внутри и снаружи полости.
2. Воздушное демпфирование при вибрациях	При $P \leq 10^{-1}$ Па влияние процесса на систему практически одинаково, при повышении давления с $P=10^{-1}$ до $P=10^5$ Па интенсивность процесса меняется, сам процесс постепенно затухает	$10^{-1} \dots 10^5$ Па	Проблема разрешима. Использование виброзащиты, оптимизация конструкции и крепления корпусов и защитных оболочек
3. Теплопередача излучением	При $P \leq 10^{-2}$ Па процесс теплопередачи осуществляется за счет излучения и является неэффективным. В этом случае придется решать серьезную задачу по отводу тепла из системы.	$10^{-2} \dots 10$ Па	Проблема весьма сложная. Посадка деталей с натягом, использование при контакте деталей тонких фольг, специальных смазок, использование тепловых труб и подобных устройств для сброса избыточного тепла

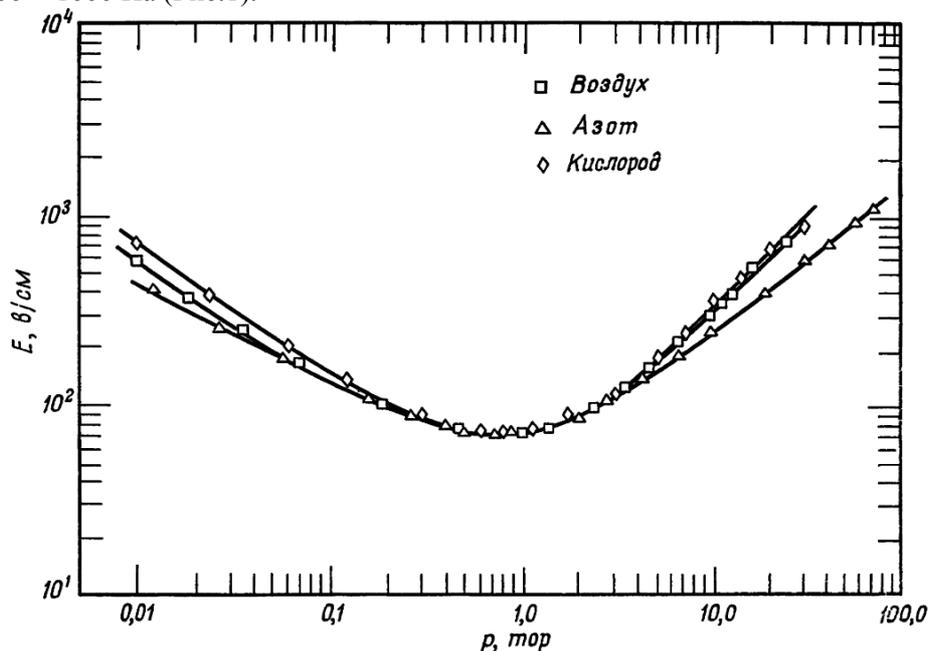
4. Конвективный теплообмен	При $P \geq 10$ Па и выше процесс теплопередачи осуществляется за счет конвекции и с повышением давления эффективность процесса растет. С точки зрения улучшения характеристик теплообмена, чем выше давление – тем лучше.	$10 \dots 10^5$ Па	Проблема разрешима. Посадка деталей с натягом, использование при контакте деталей тонких фольг, специальных смазок, использование тепловых труб и подобных устройств для сброса избыточного тепла
5. Электрофизические явления в диэлектриках; электрические разряды в газах	Для узла левитации с длиной электромагнитных волн 0,4 метра [10], что примерно соответствует частоте 1 ГГц, из приведенных кривых в книге [11] видно, что наихудшим давлением с точки зрения возникновения пробоев является давление от 100 до 1000 Па.	$10^2 \dots 10^3$ Па	Проблема сложная. Необходим выбор специальных электроизоляционных материалов, заливка компаундами, требования при конструировании высоковольтных узлов. Возможно, для минимизации электрофизических явлений потребуются давление до 100 Па.
6. Физические и механические свойства материалов (конструкционная прочность, ползучесть, внутреннее демпфирование)	Степень влияния высокая, например лакокрасочные слои твердеют и становятся более хрупкими, клеющие ленты вздуваются, клеющие материалы имеют большое газовыделение, впоследствии загрязняют электронику, оптику и т.д.	$10^2 \dots 10^5$ Па	Проблема решаемая. Использование материалов с низкими давлениями насыщенных паров, уменьшение температур материалов, нанесение защитных покрытий, подбор «негазовыделяющих» материалов и др.
7. Работа подвески поезда, приборов, автоматики в вакууме	Образуется локальная атмосфера вокруг поезда	$10^2 \dots 10^5$ Па	Проблема решаемая. Предварительное обезгаживание материалов и узлов вакуумного поезда.
8. Холодная сварка	- Влиять будет при $P \leq 10^{-5}$ Па	$\leq 10^{-5}$ Па	При давлении 1-1000 Па влияние незначительно
9. Массопотери	- Испарение $P \leq 10^{-5}$ Па - Сублимация $P \leq 10^{-5}$ Па - Абсорбция $P \leq 10^{-5}$ Па - Десорбция $P \leq 10^{-5}$ Па - Химическое взаимодействие остаточного газа с материалом поверхности $P \leq 10^{-5}$ Па - Сухое трение $P \leq 10^{-5}$ Па	$\leq 10^{-5}$ Па	При давлении 1-1000 Па влияние незначительно
10. Наличие паров воды в системе, образование конденсата.	Степень влияния на транспортную систему высока, например, процесс коррозии, вероятность появления в замкнутой системе бактерий, колебания плотности воздуха от влажности и др.	$10^{-1} \dots 10^5$ Па	Проблема решаемая. С целью исключения жидкой фазы в вакуумном трубопроводе и узлах вакуумно-левитационного транспорта, необходимо, чтобы давление в системе было ниже давления тройной точки воды $P_{т.т.} = 610$ Па.
11. Изменение плотности воздуха от температуры	Плотность воздуха растет с повышением давления и понижением температуры. При одинаковом давлении плотность воздуха при $T = -40$ °C	$10^{-1} \dots 10^5$ Па	

	больше плотности при $T=50^{\circ}\text{C}$ в 1,3 раза. Таким образом в холодное время года вакуумный поезд будет потреблять больше энергии на преодоление лобового сопротивления		
--	---	--	--

Рассмотрев все процессы и физические явления, которые могут произойти в вакуумном трубопроводе, отбросив сложные случаи, можно сделать следующий вывод:

1. Давление в системе должно быть  $P < 100$  Па (согласно п.5 Табл.4);
2. Давление в системе должно быть  $P > 10$  Па (согласно п.3,4 Табл.4).

Если взять давление меньше 10 Па, то возникнут проблемы с отводом тепла от вакуумного поезда, поскольку конвективный процесс теплопередачи начинается при  $P > 10$  Па, если взять давление больше 100 Па, то вероятность пробоев в системе увеличится, поскольку для частоты 1 ГГц наихудшим давлением с точки зрения возникновения пробоев является давление 100 – 1000 Па (Рис.1).

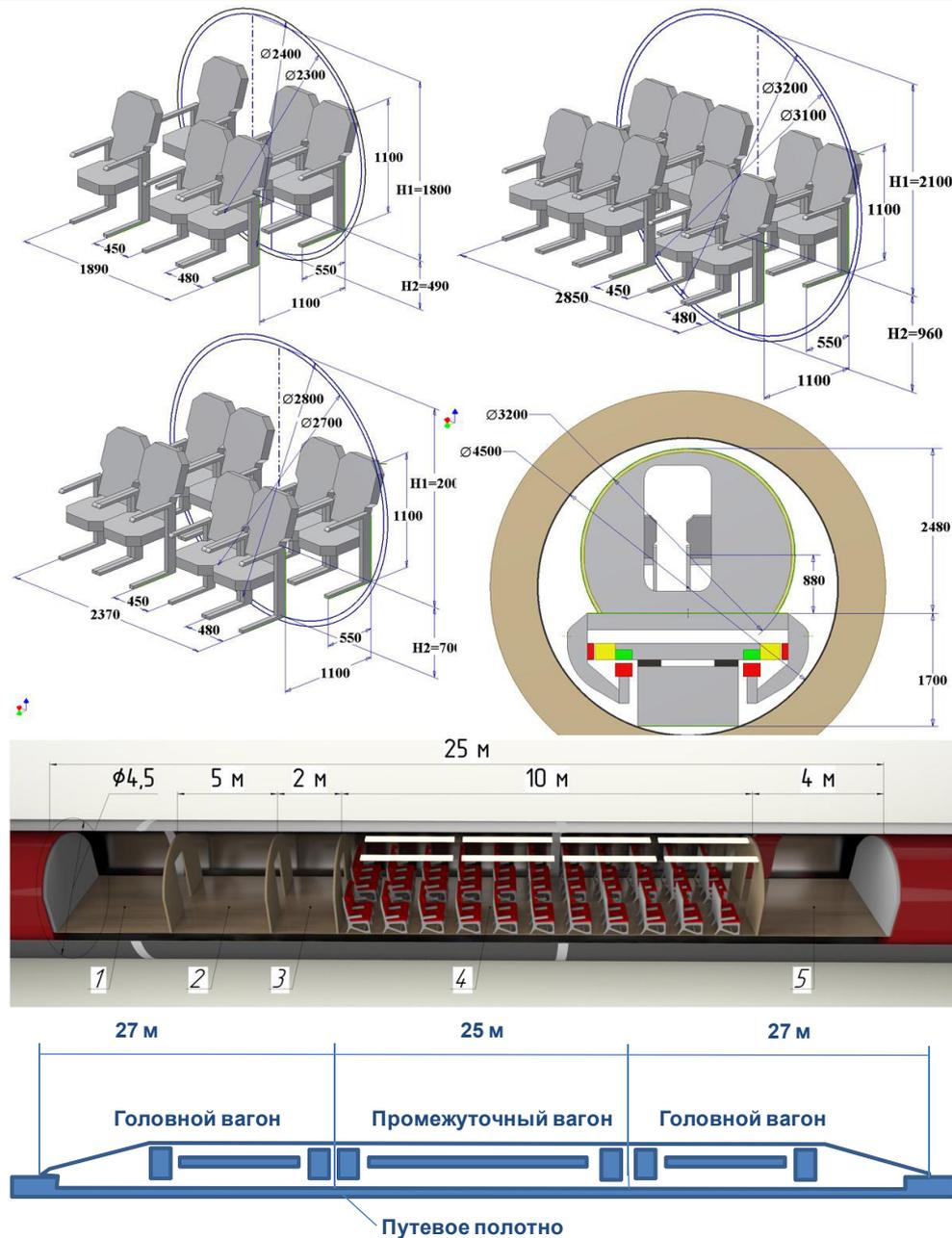


*Рис. 1. Пробой в непрерывном режиме в воздухе, кислороде и азоте на частоте 994 МГц при зазоре  $\delta=1,51$  см.*

Если в таком диапазоне давлений лобовое сопротивление поезда в вакуумном трубопроводе все же не удастся снизить до энергетически выгодного значения, то необходимо увеличивать зазор  $\delta$  между поездом и трубопроводом путем уменьшения сечения поезда или увеличения сечения трубопровода.

В то же время эквивалентный диаметр и площадь сечения вакуумного поезда зависят от компоновки салона пассажиров и системы магнитного подвеса (Рис.2), поэтому зазор  $\delta$  между поездом и стенкой трубопровода выбирается минимально возможным с учетом аэродинамики поезда.

Далее приведем аргументы в пользу выбора вакуумного оборудования определенного типа, а также расчетные данные по его количеству и энергетическим параметрам на 1000 км пути для разных габаритов вакуумного трубопровода.

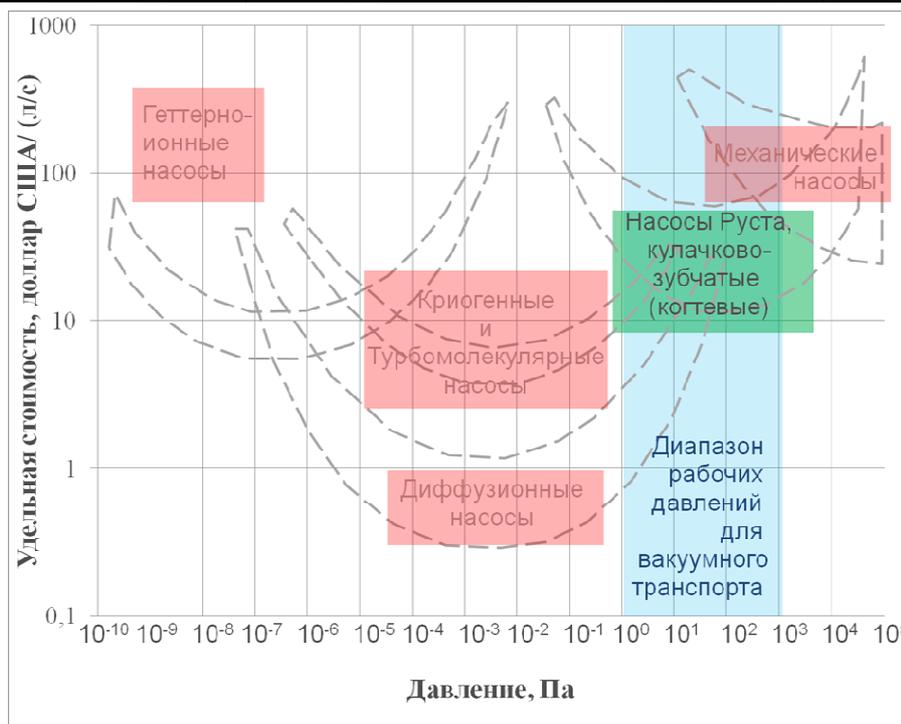


*Рис. 2. Варианты компоновки салона для пассажиров и габариты состава.  
1 - отделение для размещения оборудования и систем жизнеобеспечения; 2 - багажное отделение; 3 – туалет; 4 – салон для пассажиров (50 человек); 5 – тамбур.*

Основной особенностью развития средств вакуумной откачки на протяжении последних лет является стремление избавиться от вакуумных масел и других рабочих жидкостей.

Эта тенденция настолько сильна, что получает развитие даже в таких областях применения вакуумной техники, где этим вопросам до последнего времени не уделяли много внимания — прежде всего, в вакуумной металлургии.

Еще в 2006 году [12] были показаны основные особенности и преимущества замены паромасляных и традиционных механических насосов с масляным уплотнением на безмасляные откачные системы на базе сухих механических насосов: существенное энергосбережение и простота эксплуатации, отсутствие необходимости утилизации рабочих жидкостей и, наконец, другой качественный уровень вакуумной среды (рис.3, Таблица 2).



*Рис. 3. Удельная стоимость быстроты действия насосов различного типа.*

Таблица 2. Основные характеристики механических безмасляных форвакуумных насосов.

Принцип действия	Основные производители	Предельный вакуум, мбар	Диапазон быстроты действия, м <sup>3</sup> /ч
Кулачково-зубчатый (Когтевой) со ступенью Рутса	Busch, Edwards	0,05	80-600
Винтовой	Busch, Ebara, Edwards, Hanbell, Kashiyama, Leybold (LOT Vacuum), Pfeiffer, Shinko Seiki, Sterling SIHI, Toyota, Ulvac	0,001	75-1300
Многоступенчатый Рутса	Adixen (Alcatel), Kashiyama	0,01	90-220

Многие производители устанавливают на форвакуумный насос дополнительный насос Рутса, в результате чего примерно на порядок вырастает предельный вакуум, и до нескольких раз производительность.

Так, характерная производительность таких систем обычно 600 – 2500 м<sup>3</sup>/ч, а предельный вакуум 0,5...10<sup>-2</sup> Па.

Кроме того, существуют специальные решения для откачки камер больших объемов или для работы с высокими газовыми нагрузками с производительностью в десятки тысяч м<sup>3</sup>/ч.

Данные приложения предъявляют повышенные требования к надежной безостановочной работе откачных средств в условиях высоких газовых нагрузок и при наличии твердых примесей в откачиваемом газе.

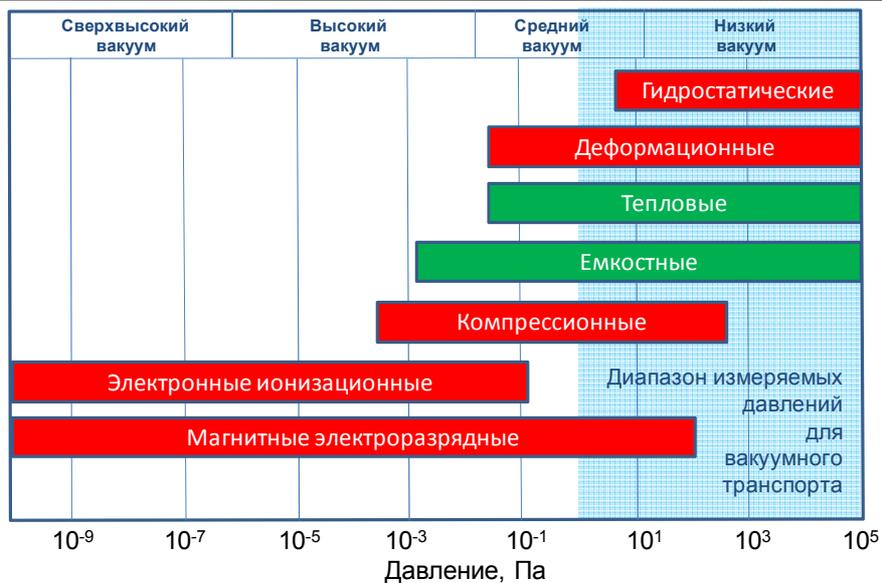


Рис. 4. Диапазон рабочих давлений вакуумметров.

Выбор вакуумметров с учетом требований к вакуумной среде представлен на рис.4. Это тепловые и емкостные вакуумметры.

Например, для измерения давления можно выбрать термодатчик KJLC 510ТС, работающий в диапазоне давлений  $10^5 \dots 10^{-1}$  Па или комбинированный датчик KJLC 392, работающий в диапазоне давлений  $10^5 \dots 10^{-7}$  Па.

Датчики не требуют подключения к блоку преобразования, а имеют экраны, на которые выводятся текущие данные о давлении в откачиваемой камере. Работают в любых пространственных положениях, обеспечивают требуемый диапазон измеряемых давлений.

Для перекрытия трубопровода можно выбрать пневматические клапаны аналогичные “VAT” Series 168, “VAT” Series 190 и “VAT” Series 091. Клапаны отвечают технологическим требованиям системы. Пневматические клапаны компактнее и надежнее, чем клапаны с электроприводом.

Оценим энергетические затраты на создание и поддержание вакуума в 10 Па в 1 км вакуумного трубопровода диаметром от 2,5 м до 5 м. Результаты расчетов представлены в Таблице 3.

Как видно из Таблицы 3 вакуумный трубопровод диаметром 4,5 м и длиной 1 км при откачке до 10 Па потребует разово 2352 кВт·ч энергии за 24 часа откачки, а при достижении давления в 10 Па на его поддержание будет уходить  $1,01 \cdot 24 = 24,24$  кВт·ч в сутки. Для сравнения можно заметить, средняя американская семья потребляет в сутки 30 кВт·ч электроэнергии.

Таблица 3. Затраты энергии на создание и поддержание вакуума в 10 Па.

Диаметр трубопровода, м	Время откачки, ч	Количество насосов на 1000 км для создания вакуума в 10 Па, шт	Максимальная потребляемая мощность насоса, кВт	Потребляемая мощность при минимальном остаточном давлении, кВт	Быстродействие насоса, м <sup>3</sup> /ч	Энергозатраты создания вакуума в 10 Па на 1000 км пути за 24,48,72 часа, кВт·ч	Энергозатраты в час на поддержание вакуума в 10 Па на 1000 км пути, кВт·ч	Энергозатраты создания вакуума в 10 Па на 1 км пути за 24,48,72 часа, кВт·ч	Энергозатраты в час на поддержание вакуума в 10 Па на 1 км пути, кВт·ч	Объем 1 км трубопровода, м <sup>3</sup>	Количество насосов на 1000 км для поддержания вакуума в 10 Па, шт
2,5	24	1255	24,1	6,7	3000	725 892	1 005	726	1,01	4 909	150
2,5	48	628	24,1	6,7	3000	726 470	1 005	726	1,01	4 909	150
2,5	72	407	24,1	6,7	3000	706 226	1 005	706	1,01	4 909	150
3	24	1807	24,1	6,7	3000	1 045 169	1 005	1045	1,01	7 069	150
3	48	903	24,1	6,7	3000	1 044 590	1 005	1045	1,01	7 069	150
3	72	586	24,1	6,7	3000	1 016 827	1 005	1017	1,01	7 069	150
3,5	24	2460	24,1	6,7	3000	1 422 864	1 005	1423	1,01	9 621	150
3,5	48	1230	24,1	6,7	3000	1 422 864	1 005	1423	1,01	9 621	150
3,5	72	819	24,1	6,7	3000	1 421 129	1 005	1421	1,01	9 621	150
4	24	3213	24,1	6,7	3000	1 858 399	1 005	1858	1,01	12 566	150
<b>4</b>	<b>48</b>	<b>1606</b>	<b>24,1</b>	<b>6,7</b>	<b>3000</b>	<b>1 857 821</b>	<b>1 005</b>	<b>1858</b>	<b>1,01</b>	<b>12 566</b>	<b>150</b>
4	72	1071	24,1	6,7	3000	1 858 399	1 005	1858	1,01	12 566	150
4,5	24	4066	24,1	6,7	3000	2 351 774	1 005	2352	1,01	15 904	150
4,5	48	2033	24,1	6,7	3000	2 351 774	1 005	2352	1,01	15 904	150
4,5	72	1355	24,1	6,7	3000	2 351 196	1 005	2351	1,01	15 904	150
5	24	5020	24,1	6,7	3000	2 903 568	1 005	2904	1,01	19 635	150
5	48	2510	24,1	6,7	3000	2 903 568	1 005	2904	1,01	19 635	150
5	72	1673	24,1	6,7	3000	2 902 990	1 005	2903	1,01	19 635	150

### 3. Система кондиционирования ВЛТС.

В общем случае бортовая система кондиционирования, будь она открытого, закрытого или смешанного типа, в герметическом салоне при любых атмосферных условиях и для всех режимов транспортировки должна поддерживать заданные давление, температуру, влажность, физико-химический состав воздуха, а также допустимый уровень шума.

Тепловой баланс салона с системой кондиционирования с панельным теплообменом [13]:

$$Q_I + Q'_I + Q_{осв} - Q_{nl} - Q_{nm} = G_{ch} \cdot c_p \cdot \Delta t_k,$$

где  $\Delta t_k$  - изменение температуры воздуха в салоне;  $Q_I$  - количество тепла, выделяемое пассажирами,  $Q'_I$  - количество тепла от одной панели;  $Q_{осв}$  - количество тепла от электроприборов (освещение, генераторы, аккумуляторы);  $Q_{nl}$  - количество тепла, передаваемого от панели в салон;  $Q_{nm}$  - количество тепла, отдаваемого через потолок и боковые стены салона;  $Q_{nl}$  - количество тепла, отдаваемого через пол салона.

Результаты расчёта представлены в таблице 4.

Таблица 4. Относительные параметры системы кондиционирования.

$Q$ - количество тепла, Вт.		$T$ - температура салона, °С.	
$Q^I$	5000	в салоне	22
$Q'^I$	3480	распределение температуры в салоне	±2
$Q^{осв}$	1890		
$Q^{nl}$	8020		
$Q^{nl}$	320	у пола	20
$Q^{nm}$	850	у потолка	24

### 4. Система жизнеобеспечения.

Время пребывания людей в герметичной камере (в нашем случае салон вакуумного поезда) оценивается по формуле:

$$T = (V_{кр} - 0,08 \cdot n) \cdot (K_0 - K) / M \cdot n,$$

где  $T$  — допустимое время пребывания в камере, час;

$V_{кр}$  — критический объем салона, в котором  $n$  людей смогут находиться в течение времени  $T$ , л;

$n$  — число людей в камере;

$K_0$  — допустимая концентрация углекислого газа, л/л;

$K$  — начальная концентрация углекислого газа перед закрытием камеры, л/л;

$M$  — среднее выделение углекислого газа одним человеком в камере, л/час;

Минимальный объем салона, в котором  $n$  человек смогут перемещаться в течение времени  $T$ :

$$V_{кр} = n \cdot (T \cdot M + 0,08 \cdot K_0 - 0,08 \cdot K) / (K_0 - K)$$

Оценим этот объем для следующих параметров:

$$T = 1/6 - 1 \text{ ч} - \text{время между остановками};$$

$$n = 55 - \text{количество человек};$$

$$M = 30 \text{ л/ч} - \text{среднесуточное выделение углекислого газа на человека};$$

$$K_0 = 0,005;$$

$$K = 0,0003 - \text{для случая, если воздух не загазован};$$

Полученные данные приведены в Таблице 5. Они дают возможность примерно оценить, когда потребуется система жизнеобеспечения с газификатором, а когда возможно обойтись проветриванием салона во время посадки-высадки пассажиров.

Таблица 5. Минимальный объем салона, в котором 55 человек смогут находиться в течение времени  $T$ .

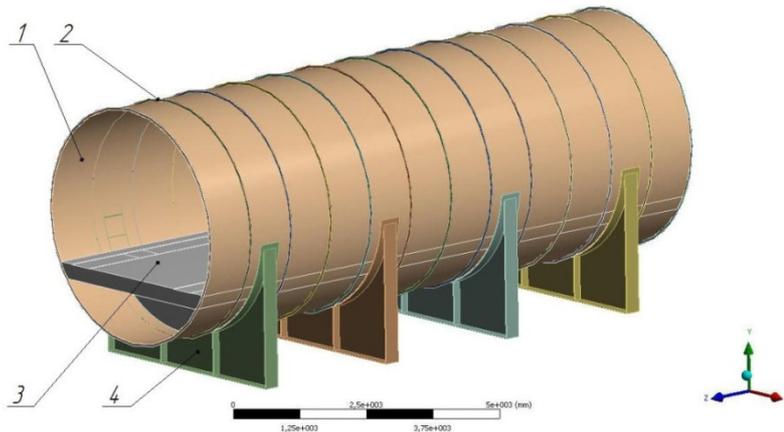
Время поездки $T$ , мин	Критический объем салона $V_{кр}$ , м <sup>3</sup>
10	59
20	117
30	176
40	234
50	293
60	351

Пример использования Таблицы 5:

Объем рассматриваемого салона поезда (для вакуумного трубопровода 4,5 м) равен  $100,3 \text{ м}^3$ . Отсюда видно, что при времени поездки 10-15 минут возможно обойтись проветриванием салона (межрегиональные электропоезда), а при времени поездки 60 минут (поезда дальнего следования) будет необходима система жизнеобеспечения с газификатором.

### 5. Строительная ячейка магистрали ВЛТС.

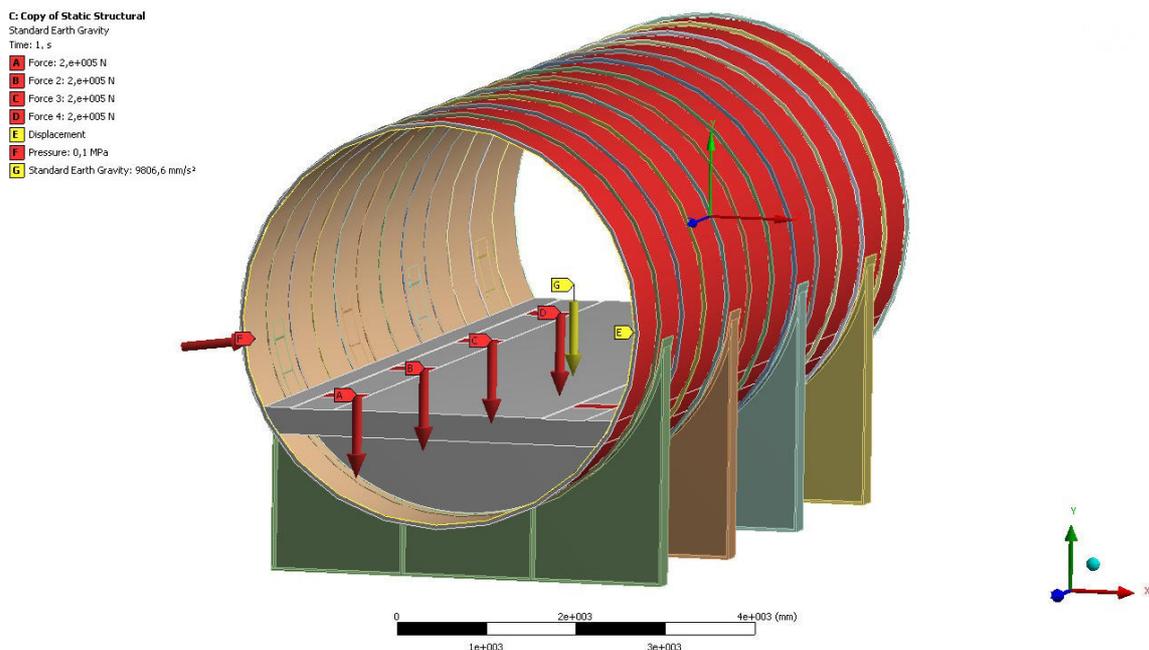
Приведем основные элементы конструкции строительной секции вакуумного трубопровода с расположенной внутри системой магнитного подвеса.



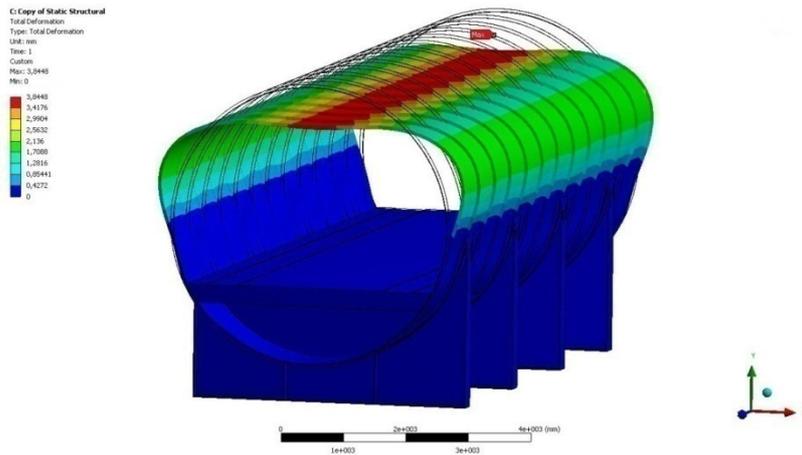
*Рис.5. Общий вид секции вакуумного трубопровода.*

*1 – обечайка цилиндрическая; 2 – поперечные ребра жесткости; 3 – опора электромагнитного подвеса; 4 – опора обечайки вакуумного трубопровода.*

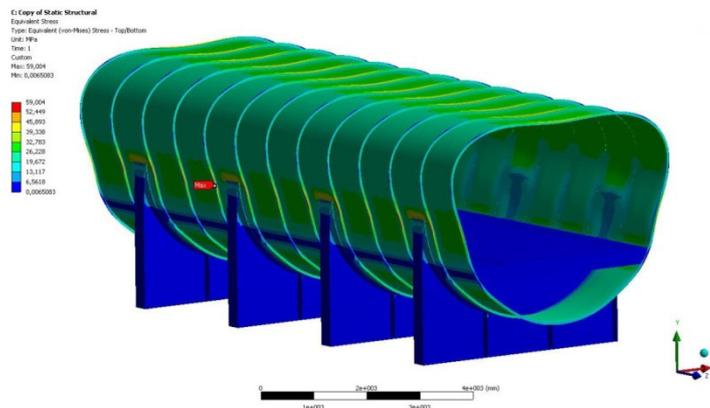
На Рис. 6-8. представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния секции вакуумного трубопровода с учетом гравитации в программной среде конечно-элементного анализа ANSYS.



*Рис.6. Расчетная схема секции вакуумного трубопровода.*

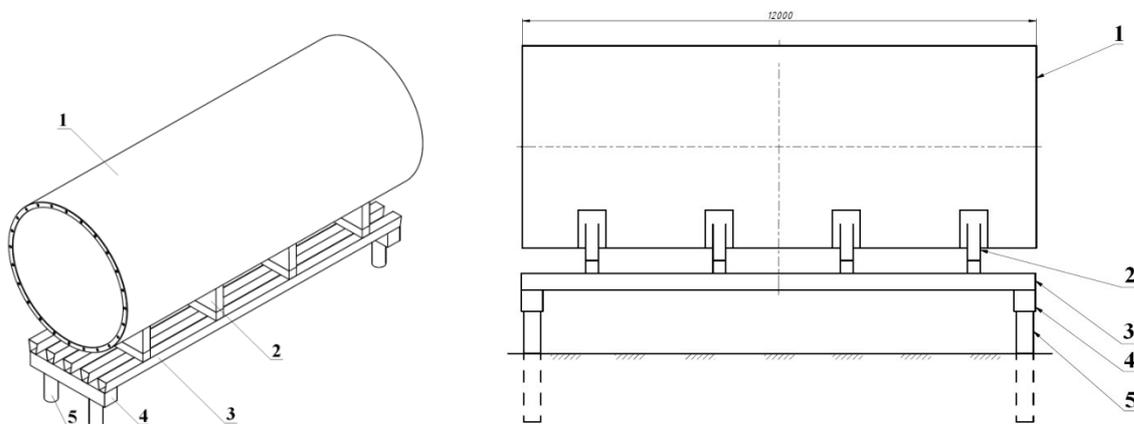


*Рис.7. Суммарные перемещения секции вакуумного трубопровода.*



*Рис.8. Напряженно-деформированное состояние секции вакуумного трубопровода.*

Опоры вакуумного трубопровода устанавливаются на ортотропную плиту или продольные балки. Ортотропная плита монтируется на ригель, а ригель в свою очередь установлен на сваях. Сваи монтируются в грунт. Окончательный вид скомпонованной строительной ячейки магистрали вакуумно-левитационной транспортной системы представлен на Рис. 9.



*Рис.9. Способ компоновки основной строительной ячейки магистрали вакуумно-левитационной транспортной системы. 1 – вакуумный трубопровод; 2 – опора вакуумного трубопровода; 3 – продольные балки либо ортотропная плита; 4 – ригель; 5 – сваи.*

## **6. Выводы.**

Проектирование и расчет конструкции вакуумного трубопровода, а также систем откачки, кондиционирования, жизнеобеспечения вакуумного поезда, их оценка и оптимизация, позволит снизить возможные риски создания вакуумно-левитационной транспортной системы.

Полученные данные, в свою очередь, позволяют рассчитать затраты на постройку вакуумно-левитационной системы с целью технико-экономического обоснования проекта и снижения рисков инвестиционных вложений.

## Литература

1. Hyperloop Alpha. Intro. // <http://www.spacex.com> : сайт SpaceX. 2016. URL. [http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf) (дата обращения 22.08.2016).
2. Форгач Р.Л. Скоростной вакуумный трубопроводный транспорт — конкурент реактивной авиации // Наземный транспорт 80-х годов. — М.: Мир, 1974.-С 121-137.
3. Zhang Y.P., Oster D., Kumada M. Key vacuum technologies to be solved in evacuated tube transportation // Journal of Modern Transportation. 2011. 19(2): P. 110-113.
4. В.М. Фомин, Д.Г. Наливайченко, Ю.А. Терентьев. К вопросу выбора диапазона рабочих параметров вакуумного магнитолевитационного транспорта. Материалы XI Международной научно-технической конференции. Под редакцией доктора технических наук, профессора Нестерова С.Б. М.: НОБЕЛЛА. 2016. с.273 – 283.
5. И.А. Воробьев, Р.О. Кондратенко, С.Б. Нестеров, А.Н. Белоконев. Высокоскоростной транспорт на основе магнитной левитации в разреженной среде. Материалы IX Международной научно-технической конференции. Под редакцией доктора технических наук, профессора Нестерова С.Б. М.: НОБЕЛЛА. 2014. с.247 – 263.
6. Patent Number 5433155 «High speed transport system»/ Inventors: O'Neill et al. / July 18, 1995.
7. Движение без трения. // Сайт, посвященный Борису Петровичу Вейнбергу. 2015. URL. [http://veinberg.o7.ru/pdf/no\\_friction\\_motion.pdf](http://veinberg.o7.ru/pdf/no_friction_motion.pdf) (дата обращения 22.08.2016).
8. Ozawa K. The Experiment on the Supersonic Rocket Train (яп.) // Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers : журнал. — 1970. — 第73 (618) 数. — 第1000-1005 頁.
9. Enclosed tube maglev system tested in China// Tech Xplore. 2016. URL. <https://techxplore.com/news/2014-05-enclosed-tube-maglev-capable-mph.html> (дата обращения 22.08.2016).
10. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф., Коськин Ю.П. Магнито-левитационная транспортная технология / Под ред. старшего вице-президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановича. – СПб.: Питер, 2013. – С.60.
11. Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969. с. 206.
12. Ю. К. Васильев, С. Б. Нестеров, Т. С. Васильева, Анализ современного состояния рынка оборудования систем создания и поддержания вакуума, ВТТ, 2006, т. 16, №1, с. 55-62.
13. Воронин Г.И. Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах. М. «Машиностроение», 1973, с. 170-174.