

Review of the Numerical and Experimental Studies of the Hyperloop

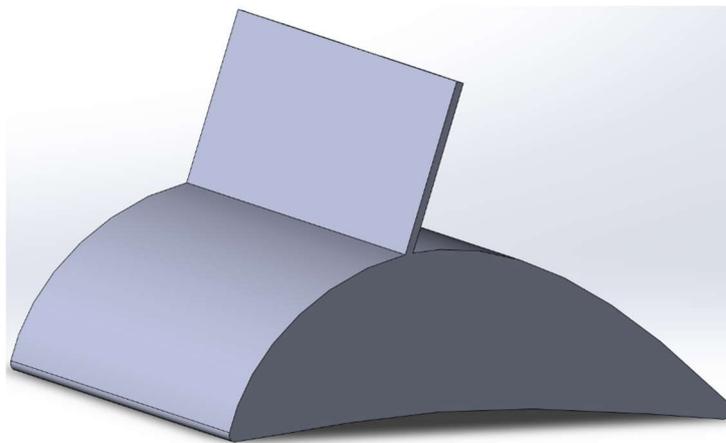
D. S. Yatsukhno

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,
Moscow, 119526, Russia
yatsukhno-ds@rambler.ru*

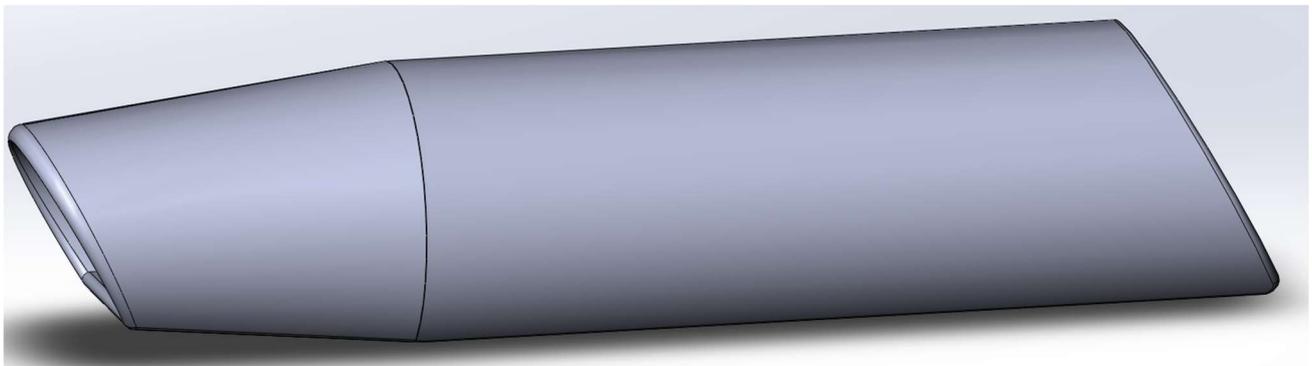
Abstract

This paper is devoted to a review of computational and experimental work on modeling the aerodynamics of high-speed Hyperloop train various configurations, which is a pod moving in a tunnel, which provides the possibility of rarefaction of the environment. Under such conditions, a significant increase in train speed is expected, which can exceed 1200 km/h. The review compactly presents information about the most typical conditions for the potential operation of Hyperloop, such as the developed speed, tube pressure and temperature, and the blocking ratio. The main gas-dynamic features of the Hyperloop high-speed movement in a rarefied gas tunnel are listed. They have a significant aerothermodynamic characteristics and overall transport system efficiency effect.

Keywords: Hyperloop pod, aerodynamics optimization, choked flow, axial compressor, Kantrowitz limit, drag coefficient



Hyperloop pod with brake deployment (in accordance with [14])



Hyperloop pod perspective configuration (in accordance with [21])

УДК 533.6

Обзор работ по численному и экспериментальному исследованию модели перспективного поезда Hyperloop

Д. С. Яцухно

*Институт Проблем Механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1*

yatsukhno-ds@rambler.ru

Аннотация

Настоящая работа посвящена обзору расчетно-теоретических и экспериментальных работ по моделированию аэродинамики различных конфигураций высокоскоростного поезда Hyperloop, представляющего собой вагон-капсулу, перемещающуюся в трубе-тоннеле, в которой обеспечено значительное разрежение среды. В таких условиях ожидается существенное увеличение скорости поезда, которая может превышать 1200 км/ч. В обзоре компактно изложена информация о наиболее характерных условиях потенциальной эксплуатации Hyperloop, таких как развиваемая скорость, давление и температура в трубе, соотношение поперечных сечений капсулы и трубы. Перечислены основные газодинамические особенности скоростного движения вагона Hyperloop в тоннеле с разреженным газом, которые оказывают определяющее влияние на аэротермодинамические характеристики и общую эффективность данной транспортной системы.

Ключевые слова: капсула Hyperloop, аэродинамическая оптимизация, поток с местным сопротивлением, осевой компрессор, предел по Кантровицу, коэффициент аэродинамического сопротивления.

1. Введение

Hyperloop – один из перспективных проектов высокоскоростного поезда, в основе которого лежит идея о реализации движения капсулы с пассажирами в вакуумированном тоннеле с использованием электродвигателей. По предварительным оценкам скорость капсулы в таких условиях может достигать до 1500 км/ч [1]. Следует отметить, что близкие по смыслу концепты, существенно отличающиеся от традиционных видов железнодорожного транспорта, предлагались и ранее [2–6]. Среди подобных проектов следует выделить маглев [2–4], в котором движение поезда осуществляется с использованием магнитной левитации, обеспечиваемой системой мощных магнитов. При этом исключается трение вагона об рельс, в силу отсутствия последнего, что позволяет развивать скорость до 600 км/ч. Наибольшего прогресса в данном направлении удалось достичь в Германии, Японии, Южной Корее и Китае. Куда более амбициозный, хотя и не реализованный проект, называемый вакуумным поездом [5–6], представляет собой сочетание принципов магнитной левитации (или использования воздушной подушки) и движения в тоннеле с сильно разреженным воздухом. Верхние оценки возможной скорости подобного поезда доходили до 1600 км/ч. Первые идеи подобного транспорта публиковались как в России (1911 г.) [7], так и за рубежом (1909 г.) [8] еще в начале 20-го века. В современных условиях практическая реализация поезда, движущегося в глубоком вакууме, по-прежнему сталкивается с такими проблемами как высокая стоимость необходимой инфраструктуры и опасность разгерметизации тоннеля. Hyperloop представляет собой компромиссное решение в части обеспечения разрежения в тоннеле до уровня

форвакуума. К настоящему моменту данный проект находится в стадии практической реализации в США, Германии, Франции, Китае, Индии, Саудовской Аравии. В 2019 году капсулу Hyperloop удалось разогнать до 463 км/ч в ходе тестовых испытаний [9]. В 2024 году испытания в Китае продемонстрировали разгон Hyperloop уже до 623 км/ч [10]. Первая пробная перевозка пассажиров состоялась в 2020 году [11]. При этом удалось опробовать вагон Hyperloop в куда более щадящих скоростных условиях – была достигнута скорость около 170 км/ч, поездка продолжалась 6.25 с.

Таким образом, на данной стадии развития по показателям достигнутой скорости Hyperloop уже не уступает традиционным высокоскоростным поездам (которые могут ускоряться до 570 км/ч). Общие перспективы подобного проекта во многом определяются целесообразностью развития данного вида транспорта в каждой конкретной стране [12]. Тем не менее Hyperloop является интересной конфигурацией для развития специальных компьютерных кодов, предназначенных для решения широкого класса фундаментальных и прикладных задач, среди которых:

- 1) Исследование газодинамических особенностей обтекания капсулы Hyperloop в тоннеле в виде круглой трубы при дозвуковых, трансзвуковых и малых сверхзвуковых скоростях.
- 2) Изучение особенностей образующихся в процессе движения конфигураций ударных волн и их взаимодействия со стенками тоннеля и капсулы.
- 3) Выбор наиболее подходящей модели турбулентности, учитывающей специфику течения – малые числа Рейнольдса, и сравнительно большие числа Маха, возможное наличие отрывных течений.
- 4) Определение оптимальной аэродинамической формы капсулы, обеспечивающей минимальный коэффициент сопротивления от действия сил трения и давления, достаточную для удержания капсулы в состоянии устойчивого равновесия подъемную силу, минимизацию областей отрыва потока, адекватный тепловой режим поверхности. Изучение вопроса оптимизации габаритных размеров капсулы. Определение оптимального соотношения поперечных площадей трубы и капсулы.
- 5) Анализ возможных компоновок капсулы Hyperloop, например с осевым компрессором, предназначенным для снижения давления в передней части вагона и, следовательно, снижающего лобовое сопротивление капсулы.
- 6) Исследование влияния условий вакуумирования на процесс обтекания (давление и температура в трубе).

Данный обзор ориентирован на рассмотрение современных публикаций, связанных с исследованием вышеперечисленных проблем. Одной из основных целей является определение актуальных постановок задач (геометрия модели, исходные данные, моделируемые параметры) для разработки и развития соответствующих предметно-ориентированных компьютерных кодов.

2. Обзор публикаций

В работе [13] были рассмотрены вопросы численного моделирования движения капсулы Hyperloop упрощенной формы в трубе при дозвуковых и трансзвуковых скоростях (рис. 1). Расчеты были выполнены для полной нестационарной системы уравнений Навье – Стокса, описывающей движение сжимаемого газа, с использованием метода контрольного объема. Для учета турбулентных эффектов применялась $k - \omega$ SST модель. Было продемонстрировано, что скорость капсулы, а также степень вакуумирования канала (давление в трубе) существенным образом влияют на величину аэродинамического сопротивления. Также исследовались различные конфигурации головной (полукруглая, эллиптическая, плоская наклонная) и хвостовой частей капсулы. В результате были определены оптимальные для заданных режимов эксплуатации формы, а также проведена оценка перспективы применения отсоса пограничного слоя с целью минимизации сопротивления капсулы. Отдельные усилия

были направлены на определение наиболее эффективных режимов работы бортового компрессора – устройства, обеспечивающего изменение структуры течения в окрестности обтекателя капсулы за счет пропускания воздуха через себя, вследствие чего происходит уменьшения воздушной массы, обтекающей капсулы, и таким образом дополнительно снижается аэродинамическое сопротивление. Общие результаты выполненных расчетов отчетливо показывают тенденцию опережающего роста силы сопротивления с увеличением скорости капсулы.



Рис. 1. Варианты упрощенной формы капсулы Hyperloop: *а*) с плоской наклонной головной частью; *б*) с затупленной сферической головной частью (по материалам работы [13])

Перспективы применения аэродинамического сопротивления как неотъемлемой части системы торможения капсулы Hyperloop были изучены в работе [14]. Для обеспечения работоспособности такой системы капсула оснащалась специальным щитком (рис. 2), изменением положения которого регулировалась сила сопротивления.

Рассматривались режимы обтекания капсулы со скоростями 100, 135 и 150 м/с при различных углах наклона щитка. Следует отметить, что в рамках работы [14] исследовалась существенно более реалистичная форма капсулы, чем в работе [13]. Значительное внимание было уделено выбору модели турбулентности, позволяющей с удовлетворительной точностью моделировать течение в областях отрыва потока. В качестве одного из ключевых результатов было отмечено существование дополнительной прижимающей силы, которая возникает при значительном отклонении щитка. По мнению авторов работы [14] эта сила может быть использована для обеспечения большего равновесия капсулы в процессе движения в трубе.

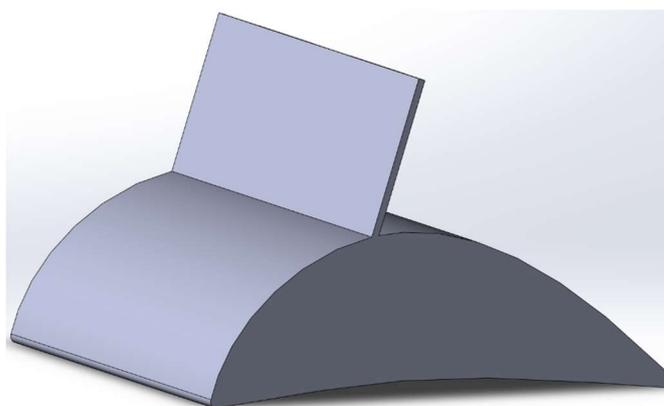


Рис. 2. Аэродинамическая форма капсулы Hyperloop с системой торможения в виде щитка (по материалам работы [14])

В статье [15] была изложена последовательная методика аэродинамического проектирования оптимальной формы капсулы Hyperloop (рис. 3), которая включает в себя три основных этапа. На первом выполняется одномерный расчет с использованием упрощенной модели, в ходе которого определяется распределение числа Маха и распределение давления (фактически коэффициента поверхностного трения по корреляционным соотношениям) по поверхности капсулы. Второй этап основывается на двумерных расчетах с использованием усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса сопряженных с моделью турбулентности $k - \omega$ SST. Аналогичная модель применяется и в пространственных расчетах. Процедура оптимизации по нескольким критериям (например, минимальное сопротивление и максимальная подъемная сила) выполнялась между первым и вторым этапом, затем выполнялся цикл двумерных расчетов, результаты которых в результате итерационного подхода использовались в оптимизационных расчетах. На заключительном этапе выполнялась верификация результатов путем сравнения с трехмерными расчетами.

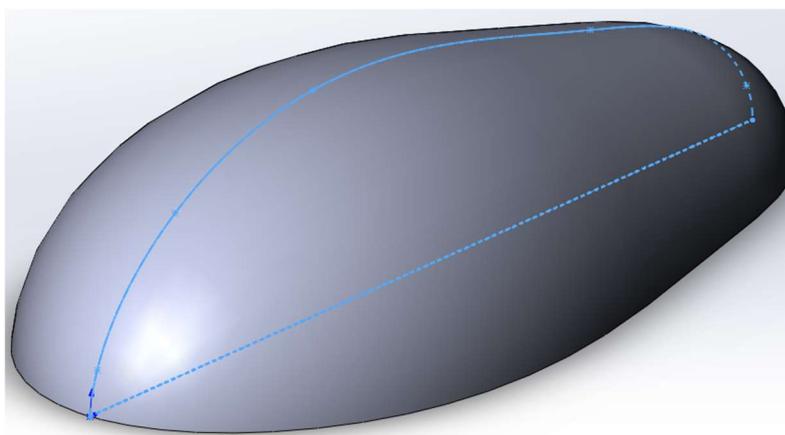


Рис. 3. Оптимизированная форма капсулы Hyperloop, обеспечивающая минимальное сопротивление (по материалам работы [15])

В упомянутых ранее работах рассматривались скоростные режимы капсулы Hyperloop в пределах $M = 0.3 \div 0.6$. В публикации [16], посвященной изучению аэротермодинамики Hyperloop в условиях возмущенного потока при наличии ударных волн в туннеле, скорость пассажирского вагона находилась в диапазоне $M = 0.82 \div 1.47$. Отмечается существенное увеличение силовой и тепловой нагрузки на капсулу, а также интенсивное ударно-волновое взаимодействие в канале. Было показано, что степень разрежения воздуха в тоннеле в значительной степени определяет возможное параметрическое соотношение между поперечным размером капсулы и диаметром канала. Несмотря на то, что исследование конфигураций Hyperloop на данный момент не сопровождается большим количеством опубликованных экспериментальных данных в рамках работы [16] было выполнено качественное сравнение с результатами экспериментов, проведенных в близких условиях ($T_0 = 317.8$ К, $M = 1.97$). Кроме того, были приведены результаты расчетов с использованием LES, DES и $k - \varepsilon$ моделей.

В статье [17] при анализе аэродинамических характеристик капсулы Hyperloop был использован подход, аналогичный работе [15]. По итогам проведенных расчетов был сделан вывод о необходимости обеспечения как можно более ранней турбулизации пограничного слоя в окрестности критической точки, что позволяет снизить влияние существенных градиентов давления в этой области на аэродинамические коэффициенты. При этом рост сопротивления, обусловленного действием сил вязкого трения, компенсируется заметным снижением сопротивления от сил давления. Выбор наиболее оптимальной формы позволил повысить расчетную скорость эксплуатации с $M = 0.65$ до $M = 0.8$.

С точки зрения газовой динамики существует ограничение между соотношением поперечных сечений капсулы и трубы и пределом развиваемой скорости (коэффициент запиранья, предел Кантровица), который определяется по формуле [16]

$$\frac{S_{np}}{S_{mp}} = \left[\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{1}{M^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \frac{1}{M^2} \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}},$$

где S_{np} – площадь пространства между капсулой и стенками трубы; S_{mp} – площадь поперечного сечения трубы; γ – показатель адиабаты; M – число Маха, отражающее скорость движения капсулы в трубе. Кроме того, это соотношение дает информацию о возможности образования ударных волн, формирующихся при трансзвуковом обтекании капсулы в области позади нее. В работе [18] основное внимание было уделено вопросам преодоления данного ограничения за счет оснащения капсулы Hyperloop осевым компрессором и соответствующего изменения ее формы. Основное назначение компрессора состояло в снижении лобового сопротивления капсулы. Было показано, что наиболее подходящими с точки зрения аэродинамики и энергоэффективности являются скоростные режимы с достаточно высокими значениями числа Маха и величины коэффициента запиранья. Фактически именно такие режимы превышают предел по Кантровицу [16]. При более традиционной форме капсулы (без компрессора) фиксируются три основных режима обтекания: дозвуковое течение, сверхзвуковое течение с нормальной ударной волной, сверхзвуковое течение с ударными волнами расширения. Максимальный уровень коэффициента сопротивления отмечается при достижении предела Кантровица, а затем происходит его снижение при увеличении числа Маха.

Ключевые физические особенности обтекания капсулы Hyperloop получили подтверждение в расчетно-теоретическом исследовании [19] в рамках которого рассматривалась крупномасштабная модель транспортной системы, включающая капсулу-вагон длиной 43 м, и канал-тоннель диаметром от 5 до 6 м. Поперечный размер капсулы составлял 3 м. Нестационарное численное моделирование было проведено для скоростей $100 \div 350$ м/с, время оценки изменения основных параметров составляло 1 с. Среди заслуживающих внимание результатов следует отметить немонотонный характер изменения коэффициента сопротивления от числа Маха, при этом максимальный уровень данного коэффициента соответствует диапазону $M = 0.65 \div 0.7$. Сопротивление также увеличивается с ростом коэффициента запиранья и длины капсулы.

В работе [20] основное внимание было сфокусировано в оценке влияния температуры внутри канала на аэродинамику капсулы, движущейся со скоростью 1000 км/ч при давлении $0.1 \div 0.5$ атм. Были рассмотрены различные расчетные случаи соответствующие температуре окружающей капсулы среды $T_0 = 243 \div 393$ К. Полученные для данных условий результаты говорят об относительном выравнивании распределения давления по поверхности вагона – при повышении температуры среды снижается максимальный уровень давления и увеличивается его минимально значение. Фиксируется снижение общего сопротивления модели. Однако прирост температуры поверхности капсулы составляет $\Delta T_w = 42$ К для $T_0 = 243$ К и $\Delta T_w = 57$ К для $T_0 = 393$ К, что накладывает существенные ограничения на тепловой режим в канале. Отмечается, что температура в канале оказывает значительное влияние на структуру течения и распределение газодинамических параметрах во всех частях расчетной области.

Исследование четырех перспективных конфигураций капсулы Hyperloop было выполнено в работе [21]. Основной акцент был сделан на варьировании формы головной части капсул с целью определения наиболее оптимальной геометрии, обеспечивающей наилучшие аэродинамические характеристики. Скорость капсулы составляла 300 м/с, давление в трубе равнялось 100 Па, температура в трубе была равна 293 К. С учетом достаточно высокой скорости число Рейнольдса превышало величину 10^5 и течение полагалось полностью турбулентным. Для моделирования турбулентных эффектов была использована модель $k - \varepsilon$. Расчеты показали, что для данных условий при соотношении поперечных сечений капсулы и

трубы равным 0.36 достигаются оптимальные значения силы лобового сопротивления. На рис. 4 представлена конфигурация капсулы Hyperloop, соответствующая первому расчетному случаю. Длина данной модели, как и остальных рассмотренных геометрий была близка к величине в 10 м.

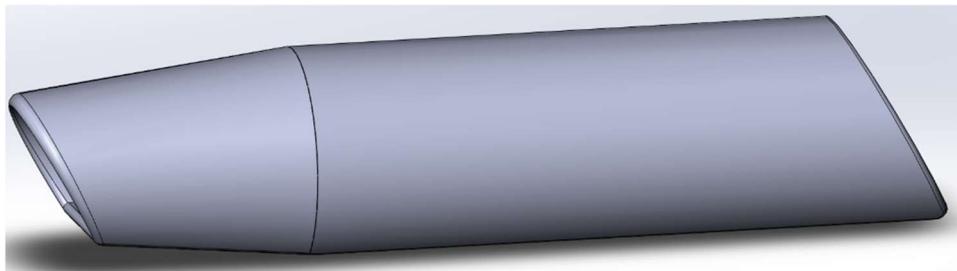


Рис. 4. Одна из возможных реалистичных форм капсулы Hyperloop (по материалам работы [21])

Вопросы предсказания ламинарно-турбулентного перехода в процессе обтекания капсулы Hyperloop были затронуты в работе [22]. Скорость движения модели составляла 125 м/с, давление в трубе равнялось 0.15 бар. Была рассмотрена модель вагона длиной 3 м, которая затем подвергалась процедуре оптимизации. Такие размеры были обусловлены необходимостью снизить сопротивление от трения, а также обеспечить как можно большую длину, на которой происходит ламинарно-турбулентный переход. Для учета данного явления использовалась гамма-модель в сочетании с привычной $k - \omega$ SST моделью без использования пристеночных функций. Результаты расчетов показывают снижение сопротивления и задержку ламинарно-турбулентного перехода для оптимизированной модели.

Экспериментальное исследование модели Hyperloop [23] было выполнено для изучения структуры и особенностей движения ударных волн для скоростей капсулы в диапазоне 160 ÷ 320 м/с и давления в трубе 0.001 атм. Экспериментальное оборудование представляло собой установку, построенную по принципу пневматической пушки, оснащенную пусковой частью высокого давления, секцией вакуумирования с размещенным в ней вакуумным насосом, измерительной секцией с направляющим проводом, удерживающим модель на заданном расстоянии от стенок трубы, а также секцией торможения. В ходе экспериментов были измерены скорость капсулы, а также скорости семейства ударных волн, образующихся в ходе движения. Было получено хорошее соответствие между стендовыми данными и расчетами по теоретическим формулам. Авторы работы [23] позиционируют свою работу как одно из первых исследований, направленных на лабораторное исследование особенностей функционирования транспортной системы Hyperloop в наиболее характерных условиях потенциальной эксплуатации.

Экспериментальные исследования из работы [23] получили свое продолжение в рамках статьи [24]. При этом была выполнена стендовая отработка практически важного случая – наличия поворота или ответвления туннеля. Для этих целей экспериментальная установка из работы [23] была модифицирована в части внедрения в измерительную секцию дополнительного канала, угол наклона которого по отношению к основной части менялся в диапазоне 30° ÷ 150°. Скорость капсулы составляла 256.8 и 295.6 м/с при давлении в трубе 143.5 Па. Дана количественная оценка влияния разветвления на интенсивность ударно-волновых структур в стендовой установке.

Вопросы верификации и валидации компьютерных кодов, предназначенных для моделирования обтекания Hyperloop, рассматривались в работе [25]. Было предложено три тестовых задачи, специфика которых позволяет учитывать многие особенности, имеющие место в случае движения капсулы Hyperloop в туннеле со сверхзвуковой скоростью. В качестве первой задачи был выбран снаряд [26], движущийся со скоростью $M = 1.1$ в условиях взаимодействия образующихся в процессе обтекания ударных волн с поверхностью земли. Зазор

между моделью и поверхностью оказывает существенное влияние на распределение давления по контуру снаряда, а также изменяет величину отхода ударной волны от носовой части. В основе второй тестовой задачи лежит конфигурация капсулы, представляющая собой упомянутый снаряд, головная и задняя часть которого имеют одинаковую форму – оживального затупленного тела. Одна из возможных постановок задачи включает нестационарный анализ эволюции ударноволновых структур при движении капсулы в тоннеле, а также сопоставление картин обтекания для свободного обтекания снаряда при околосвуковых скоростях. Наконец третья задача посвящена расчету аэродинамики капсулы в условиях изменения ее пространственного положения относительно верхней и нижней частей тоннеля. В таких условиях существенно усложняется характер взаимодействия ударных волн как с поверхностью модели, так и со стенками трубы.

В таблице 1 представлены основные параметры, характеризующие постановку задачи из рассмотренных выше публикаций [13–26].

Таблица 1

Характерные режимы обтекания Нурелоор

Параметр	Значение [Публикация]
Скорость движения капсулы	$V = 490$ км/ч, 890 км/ч, 1220 км/ч [13] $V = 100$ м/с, 135 м/с, 150 м/с [14] $M = 0.5$ [15] $V = 277$ м/с, 333 м/с, 416 м/с, 500 м/с [16] $M = 0.3$ [17] $M = 0.2 \div 0.9$ [18] $V = 100 \div 350$ м/с [19] $V = 1000$ км/ч [20] $V = 300$ м/с [21] $M = 0.36$ [22] $V = 160 \div 330$ м/с [23] $V = 258.6$ м/с, 295.8 м/с [24]
Давление	$100 \div 2000$ Па (в трубе) [13] $10600 \div 11400$ Па (на входе в трубу) [14] 10000 Па (на выходе из трубы) [14] $100 \div 50000$ Па [15] 100000 Па, 67000 Па, 33000 Па, 10000 Па, 1000 Па, 100 Па [16] 860 Па (в трубе) [17] 10132 Па (в трубе) [18] $101.325 \div 101325$ Па [19] 0.1 атм (в трубе) [20] 100 Па (в трубе) [21] 0.075 бар, 0.15 бар, 0.3 бар (в трубе) [22] 150 Па (в трубе) [23] 143.6 Па (в трубе) [24]
Температура	293 К (в трубе) [13] $332 \div 339$ К (на входе в трубу) [14] 305.4 К (на входе в трубу) [15] $250 \div 340$ К (на входе в трубу) [16] 300 К (на входе в трубу) [16]

Таблица 1 (Продолжение)

Параметр	Значение [Публикация]
Температура	300 К (в трубе) [19] 243 ÷ 393 К (в трубе) [20] 293 К (в трубе) [21] 300 К (в трубе) [22] 292 ÷ 300 К (в трубе) [23] 292 ÷ 300 К (в трубе) [24]
Число Рейнольдса, Re	6×10^4 [17] $5.2 \times 10^5 \div 2.34 \times 10^6$ [18] 10^5 [21] 1.9×10^6 , 3.8×10^6 , 7.7×10^6 [22]
Характерный размер капсулы, м	30 [13] 2.5 [14] 1 [15] 20 [16] 4.9 [18] 43 [19] 79 [20] 10 [21] 3 [22]

3. Заключение

В данной статье представлен обзор работ по численному и экспериментальному исследованию обтекания капсулы-вагона высокоскоростного поезда Hyperloop для характерных условий потенциальной эксплуатации. На основе анализа 26 публикаций, связанных в основном с расчетными исследованиями, были определены ключевые направления для развития соответствующего вычислительного инструментария:

- 1) Газодинамические особенности обтекания при до-, транс- и малых сверхзвуковых скоростях.
- 2) Ударно-волновое взаимодействие в трубах.
- 3) Проблемы турбулентности и ламинарно-турбулентного перехода для условий эксплуатации Hyperloop.
- 4) Аэродинамическая оптимизация формы вагона-капсулы.
- 5) Выбор оптимальной компоновки и конструкция вагона-капсулы.
- 6) Анализ влияния условий в трубе-тоннеле.

Следует отметить, что в рамках данного обзора весьма ограниченно представлены статьи, включающие результаты стендовых экспериментов по движению модели Hyperloop в вакуумированной трубе в силу малого количества соответствующих публикаций по данному направлению. Проблемы верификации и валидации компьютерных кодов, которым уделяется значительное внимание [27–28], при решении задач по данной тематике могут быть частично решены путем рассмотрения сторонних расчетных и экспериментальных данных при схожих исходных параметрах.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена по теме государственного задания № 124012500440-9.

Литература

1. Musk E. Hyperloop Alpha. SpaceX. 2013.
2. Schetz J. A. Aerodynamics of high-speed trains // *Annual Review of fluid mechanics*. 2001. Vol. 33. No. 1. Pp. 371–414.
3. Kwak M. A Study on Optimum Nose Shape of a Front-Rear Symmetric Train for the Reduction of the Total Aerodynamic Drag. 2013.
4. Yamamoto K., et al. Improving maglev vehicle characteristics for the Yamanashi test line // *Quarterly Report of RTRI*. 2004. Vol. 45. No. 1. Pp. 7–12.
5. Samuda J. A Treatise on the Adaptation of Atmospheric Pressure to the Purposes of Locomotion on Railways. London: Weale, 1841. 50 p.
6. Hadfield Ch. Atmospheric Railways: A Victorian venture in silent speed. Newton Abbot: David & Charles, 1967. 240 p.
7. Вейнберг Б. П. Движение без трения. Безвоздушный электрический путь. СПб.: Естествоиспытатель. 1914.
8. Goddard R. H. The limit of rapid transit // *Scientific American*. 1909. Vol. 101. № 21. P. 366.
9. Hawkins A. WARR Hyperloop pod hits 284 mph to win SpaceX competition / A hyperloop hat trick by the German team. *The Verge* (22 July 2018). 2018.
10. Tong Z. China on Track for Ultra-High Speed Trains With Hyperloop Test ‘Setting Record’. *South China Morning Post*. [Online]. 2024. Available: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3250723/china-track-ultra-high-speed-trains-hyperloop-test-setting-record>
11. <https://www.forbes.ru/newsroom/biznes/413353-pridumannyy-maskom-hyperloop-vpervye-ispytalis-passazhirami>
12. ИПЕМ. Hyperloop Москва-Санкт-Петербург: сколько может стоить проект для инвестора и пассажира? Экспертное мнение Института проблем естественных монополий (5 июля 2019).
13. Yang Y., et al. Aerodynamic simulation of high-speed capsule in the Hyperloop system // *AIAA Paper* 2017-3741.
14. Uddin M. R., et al. Drag-based aerodynamic braking system for the Hyperloop: a numerical study // *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 45. № 1. Pp. 1–10.
15. Braun J., Sousa J., Pekardan C. Aerodynamic design and analysis of the hyperloop // *AIAA Journal*. 2017. Vol. 55. No. 12. Pp. 4053–4060.
16. Sui Y., et al. Numerical analysis of the aerothermodynamic behavior of a Hyperloop in choked flow // *Energy*. 2021. Vol. 237. P. 121427.
17. Opgenoord M. M. J., Caplan P. C. Aerodynamic design of the hyperloop concept // *AIAA Journal*. 2018. Vol. 56. No. 11.
18. Bizzozero M., Sato Y., Sayed M. A. Aerodynamic study of a Hyperloop pod equipped with compressor to overcome the Kantrowitz limit // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021. Vol. 218. P. 104784.
19. Le T. T. G., et al. Numerical investigation of aerodynamic drag and pressure waves in hyperloop systems // *Mathematics*. 2020. Vol. 8. No. 11. P. 1973.
20. Bao S., et al. Numerical study on the influence of initial ambient temperature on the aerodynamic heating in the tube train system // *Advances in Aerodynamics*. 2020. Vol. 2. Pp. 1–18.
21. Singh Y. K., Mehran K. Numerical analysis for aerodynamic behavior of hyperloop pods. 2019.
22. Nick N., Sato Y. Computational fluid dynamics simulation of Hyperloop pod predicting laminar–turbulent transition // *Railway Engineering Science*. 2020. Vol. 28. Pp. 97–111.
23. Seo Y., et al. Experimental analysis of aerodynamic characteristics in the Hyperloop system // *Aerospace Science and Technology*. 2023. Vol. 137. P. 108265.
24. Seo Y., et al. Effects of branched tube on pressure waves in the hyperloop system: An experimental study // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2024. Vol. 254. P. 105902.

25. Lang A. J., et al. Benchmark problems for simulating Hyperloop aerodynamics // *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36. No. 10.
26. Doig G., Wang S., Kleine H., and Young J. Aerodynamic analysis of projectiles in ground effect at near-sonic Mach numbers // *AIAA Journal*. 2016. Vol. 54. Pp. 150–160.
27. Суржиков С. Т. Численная интерпретация экспериментальных данных по аэродинамике модели НВ-2 с использованием компьютерных кодов USTFEN и PERAT-3D // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2020. Т. 21, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-1/articles/900/>
28. Суржиков С. Т. Расчетные исходные данные для решения тестовых задач в рабочей зоне гиперзвуковой ударной аэродинамической трубы ГУАТ лаборатории РадГД ИПМех РАН // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2021. Т. 22, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/930/>

References

1. Musk E. Hyperloop Alpha. SpaceX. 2013.
2. Schetz J. A., Aerodynamics of high-speed trains, *Annual Review of fluid mechanics*, 2001, vol. 33, no. 1, pp. 371–414. DOI: 10.1146/annurev.fluid.33.1.371
3. Kwak M., A Study on Optimum Nose Shape of a Front-Rear Symmetric Train for the Reduction of the Total Aerodynamic Drag. 2013.
4. Yamamoto K., et al., Improving maglev vehicle characteristics for the Yamanashi test line, *Quarterly Report of RTRI*, 2004, vol. 45, no. 1, pp. 7–12. <https://doi.org/10.2219/rtrqr.45.7>
5. Samuda J., *A Treatise on the Adaptation of Atmospheric Pressure to the Purposes of Locomotion on Railways*, London: J. Weale, 1841, 50 p.
6. Hadfield Ch., *Atmospheric Railways: A Victorian venture in silent speed*, Newton Abbot: David & Charles, 1967, 240 p.
7. Veinberg B. P., *Frictionless movement. Airless electrical path*, St. Petersburg: Naturalist. 1914 [in Russian].
8. Goddard R. H., The limit of rapid transit, *Scientific American*, 1909, vol. 101, no. 21, p. 366.
9. Hawkins A., WARR Hyperloop pod hits 284 mph to win SpaceX competition/A hyperloop hat trick by the German team, *The Verge*, 2018.
10. Tong Z., China on Track for Ultra-High Speed Trains With Hyperloop Test ‘Setting Record’. South China Morning Post. [Online]. 2024. Available: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3250723/china-track-ultra-high-speed-trains-hyperloop-test-setting-record>
11. <https://www.forbes.ru/newsroom/biznes/413353-pridumannyy-maskom-hyperloop-vpervye-ispytali-s-passazhirami>
12. IPEM. Moscow-St. Petersburg: how much can the project cost for investors and passengers? Expert opinion of the Institute for Problems of Natural Monopolies (5 July 2019) [in Russian].
13. Yang Y., et al., Aerodynamic simulation of high-speed capsule in the Hyperloop system, *AIAA Paper* 2017-3741. <https://doi.org/10.2514/6.2017-3741>
14. Uddin M. R., et al., Drag-based aerodynamic braking system for the Hyperloop: a numerical study, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2020, vol. 45, no. 1, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2019-0120>
15. Braun J., Sousa J., Pekardan C., Aerodynamic design and analysis of the hyperloop, *AIAA Journal*, 2017, vol. 55, no. 12. <https://doi.org/10.2514/1.J055634>
16. Sui Y., et al., Numerical analysis of the aerothermodynamic behavior of a Hyperloop in choked flow, *Energy*, 2021, vol. 237. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121427>
17. Opgenoord M. M. J., Caplan P. C., Aerodynamic design of the hyperloop concept, *AIAA Journal*, 2018, vol. 56, no. 11. <https://doi.org/10.2514/1.J057103>

18. Bizzozero M., Sato Y., Sayed M. A., Aerodynamic study of a Hyperloop pod equipped with compressor to overcome the Kantrowitz limit, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, vol. 218. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104784>
19. Le T. T. G., et al., Numerical investigation of aerodynamic drag and pressure waves in hyperloop systems, *Mathematics*, 2020, vol. 8, no. 11. <https://doi.org/10.3390/math8111973>
20. Bao S., et al., Numerical study on the influence of initial ambient temperature on the aerodynamic heating in the tube train system, *Advances in Aerodynamics*, 2020, vol. 2, pp. 1–18. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-48850/v1>
21. Singh Y. K., Mehran K., Numerical analysis for aerodynamic behaviour of hyperloop pods, 2019. DOI:10.20944/preprints201912.0101.v1
22. Nick N., Sato Y., Computational fluid dynamics simulation of Hyperloop pod predicting laminar–turbulent transition, *Railway Engineering Science*, 2020, vol. 28, pp. 97–111. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00204-z>
23. Seo Y., et al., Experimental analysis of aerodynamic characteristics in the Hyperloop system, *Aerospace Science and Technology*, 2023, vol. 137. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108265>
24. Seo Y., et al., Effects of branched tube on pressure waves in the hyperloop system: An experimental study, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2024, vol. 254, pp. 105902. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105902>
25. Lang A. J., et al., Benchmark problems for simulating Hyperloop aerodynamics, *Physics of Fluids*, 2024, vol. 36, no. 10. <https://doi.org/10.1063/5.0229914>
26. Doig G., Wang S., Kleine H., and Young J., Aerodynamic analysis of projectiles in ground effect at near-sonic Mach numbers, *AIAA Journal*, 2016, vol. 54, pp. 150–160. DOI:10.2514/1.J054114
27. Surzhikov S. T., Numerical Interpretation of Experimental Data on Aerodynamics of the HB-2 Model Using Computer Codes USTFEN and PERAT-3D, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2020, vol. 21, iss. 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-1/articles/900/>
28. Surzhikov S. T., Calculated initial data for solving test problems in the working area of the hypersonic shock wind tunnel HAST of the RadGD Laboratory of the IPMech RAS, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2021, vol. 22, iss. 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-1/articles/930/>

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2024 г.