

ОЦЕНКА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА КОРПУС КАПСУЛЫ HYPERLOOP В ВАКУУМИРОВАННОМ ПУТЕПРОВОДЕ

Аннотация. Выполнена оценка аэродинамических и тепловых нагрузок на корпус вакуумированного транспортного средства при различных значениях давления в путепроводе на основе численного решения уравнений Навье-Стокса сжимаемого газа, замкнутых дифференциальной моделью турбулентности. Показано, что даже в условиях низкого давления воздуха в путепроводе высокоскоростное движение капсулы HYPERLOOP будет сопровождаться образованием локальных сверхзвуковых зон, ударных волн, систем нестационарных вихрей.

На основе численного решения уравнений Навье-Стокса сжимаемого газа, замкнутых дифференциальной моделью турбулентности получены поля газодинамических величин вблизи пассажирских капсул ВСНТ HYPERLOOP, движущихся в вакуумированном герметичном путепроводе. Полученные данные по структуре течения и интегральным значениям аэродинамических сил могут использоваться в инженерной практике при проектировании скоростного транспорта нового поколения.

Ключевые слова: математическое моделирование, уравнения Навье-Стокса, турбулентность, капсула HYPERLOOP, вакуумированный путепровод.

Введение и постановка задачи. Аэродинамика занимает важное место при проектировании высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ). При движении транспорта со скоростями выше 500 км/ч в условиях атмосферного давления основные энергетические затраты приходятся на преодоление аэродинамического сопротивления. Создание разреженной атмосферы внутри путепровода с целью существенного уменьшения потерь энергии – одна из ключевых идей проекта HYPERLOOP (рис. 1а).

Скорости движения капсулы вакуумированного ВСНТ типа HYPERLOOP задаются в диапазоне $V_{HL} = 360 \div 1080$ км/ч = $100 \div 300$ м/с. Параметры воздушной среды определяются с помощью ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная». Температура покоящего воздуха полагалась равной $T_{avn} = 288,15$ К = $+15^{\circ}$ С и неиз-

менной во всех расчетах. Атмосферное давление и плотность воздуха составляли $P_{atm} = 101325$ Па и $\rho_{atm} = 1,225$ кг/м³.

Внутри путепровода давление покоящего воздуха принимает значения от $P_{pipe} = 0,001P_{atm} = 101,3$ Па до $P_{pipe} = 0,1P_{atm} = 10132,5$ Па. Поскольку при постоянной температуре плотность покоящего воздуха прямо пропорционально давлению, то значения плотности находились в соответствующем диапазоне $\rho_{pipe} = (0,001 \div 0,1)\rho_{atm} = 0,001225 \div 0,1225$ кг/м³.

Корпорация Hyperloop Transportation Technologies 2 октября 2018 представила аэродинамический макет капсулы Quintero One [1] (рис. 16). При проведении настоящих расчетов фюзеляж капсулы определялся по геометрическим параметрам, близким к капсуле Quintero One.



Рисунок 1 – Общая схема движения капсулы HYPERLOOP в вакуумированном путепроводе (а) и аэродинамический макет капсулы Quintero One корпорации Hyperloop Transportation Technologies [1] (б)

Между днищем капсулы и путевой структурой задается некоторый аэродинамический зазор, обусловленный работой магнитного подвеса. Создание воздушной подушки под днищем капсулы не рассматривается.

Математическая постановка опирается на численное решение уравнений Навье-Стокса вязкого сжимаемого теплопроводного газа, замкнутой дифференциальной моделью турбулентности [2-4].

Рассматривается обращенное движение, когда капсула считается неподвижной и обтекаемой набегающим потоком воздуха. Принцип обращения движения является стандартом для решения аэродинамических задач и по физическому смыслу соответствует продувкам в аэродинамических трубах.

Численное моделирование проводилось в рамках специализированного пакета вычислительной аэродинамики, который был разработан сотрудниками Института транспортных систем и технологий НАН Украины [5].

Поскольку рассматриваемая расчетная область содержит центральное тело, то производилась геометрическая декомпозиция полной задачи. Декомпозиция заключается в разделении всей области интегрирования на отдельные подобласти (блоки). В каждом блоке проводился одновременный расчет состояния физического процесса обтекания с передачей информации в соседние блоки. Схема геометрической декомпозиции расчетной области приведена на рис. 2. Начало координат по оси OX соответствует максимальному значению высоты капсулы $D_{HL} = 3.2$ м. Общая длина капсулы составляла $L_{HL} = 23.58$ м, что несколько меньше, чем в представленном корпорацией Hyperloop Transportation Technologies аэродинамическом макете Quintero One. Высота трубы путепровода, принятая в расчетах, равнялась $H_{pipe} = 6.5$ м. Величина аэродинамического зазора между днищем капсулы и нижней стенкой путепровода равнялась 0.4 м.

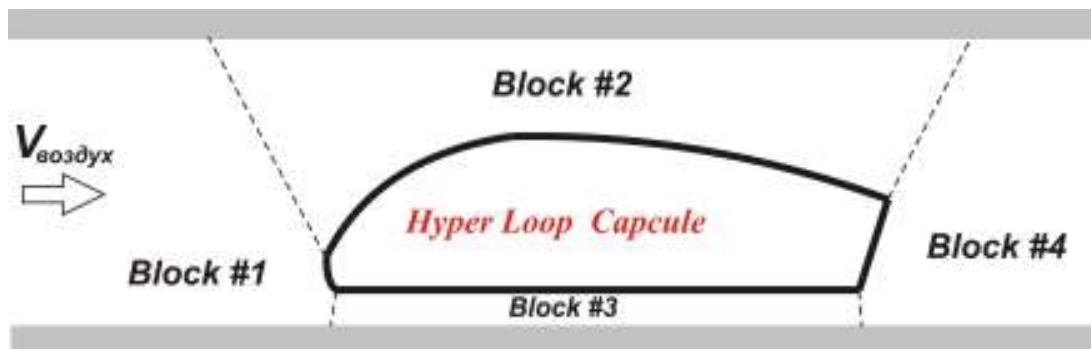


Рисунок 2 – Схема разбиения расчетной области на отдельные блоки

Результаты численного моделирования. Общая структура течения в плоскости симметрии капсулы ВСНТ HYPERLOOP представлена в виде изолиний для локальных чисел Маха (рис. 3).

Как показали вычислительные эксперименты, существует подобие распределения газодинамических величин при различных значениях давления p_{pipe} в путепроводе. Для рассматриваемого диапазона параметров все значения числа Рейнольдса соответствовали турбулентному режиму обтекания, что в конечном итоге обусловило подобие по давлению. Вместе с тем, размерное значение скорости движения капсулы оказывает ключевое влияние на структуру обтекания через безразмерное число Маха. Для рассматриваемых случаев скорости капсулы $V_{HL} = 100$ м/с; 200 м/с и 300 м/с числа Маха набегающего потока составили $M_{HL} = 0.2939$; 0.5878 и 0.8817 соответственно. Значения числа

Маха определяют кинетическую энергию набегающего потока, что в свою очередь приводит к существенным различиям в картине течения.

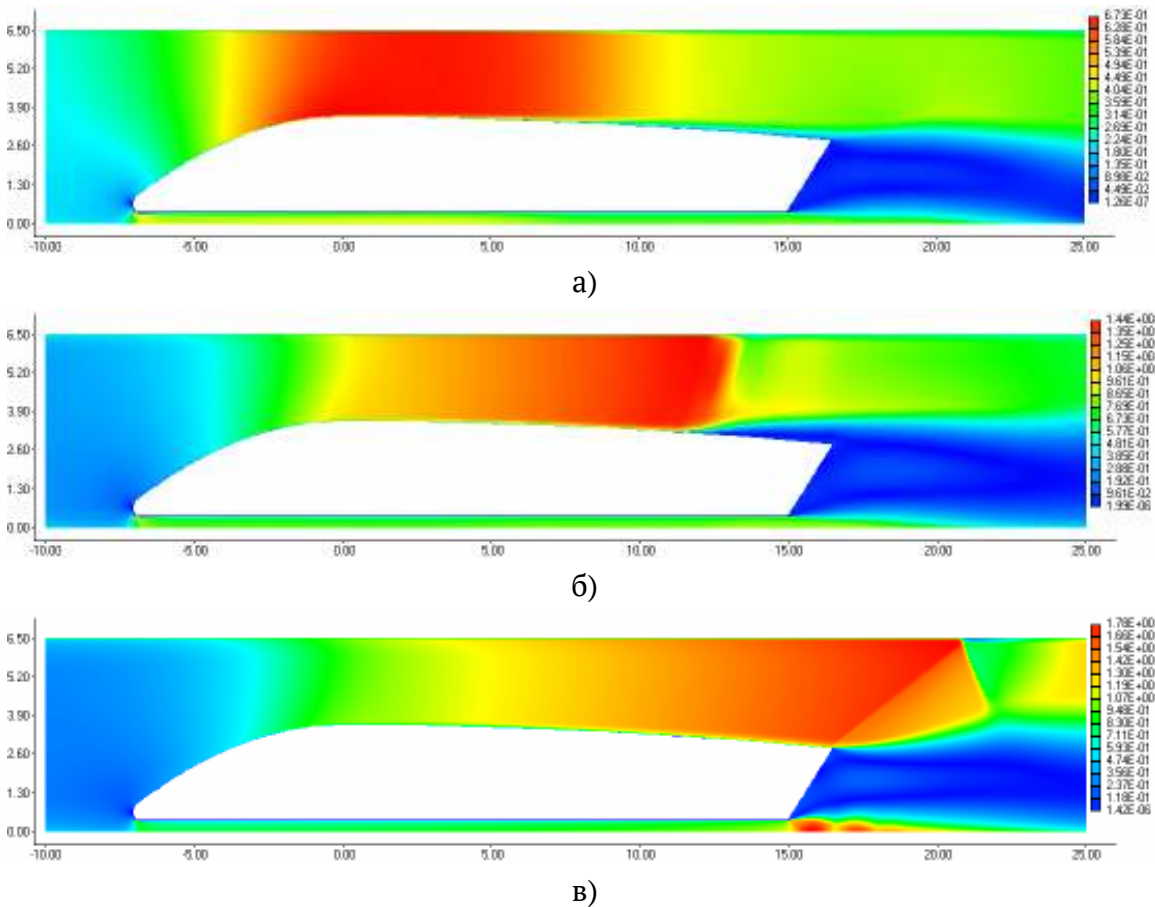


Рисунок 3 – Распределения локальных чисел Маха вблизи капсулы HYPERLOOP при $V_{HL} = 100$ м/с (а), $V_{HL} = 200$ м/с (б) и $V_{HL} = 300$ м/с (в)

Для значения скорости $V_{HL} = 100$ м/с (360 км/ч) наблюдается полностью дозвуковое течение с максимальным значением числа Маха в потоке $M_{max} = 0.673$ (рис. 3а). Конфузорно-диффузорная часть области течения в данном случае работает аналогично трубке Вентури [6]. В сужающейся части над носиком капсулы дозвуковой поток разгоняется, а затем тормозится в расширяющейся части.

При значении скорости $V_{HL} = 200$ м/с (720 км/ч) над верхней поверхностью капсулы происходит образование локальной сверхзвуковой зоны (ЛСЗ) малой интенсивности (рис. 3.б). Максимальное значение числа Маха в потоке составило $M_{max} = 1.44$. Локальная сверхзвуковая зона заканчивается прямым скачком уплотнения, располагающимся несколько выше по потоку от кормы капсулы. По своим физическим особенностям данный случай соответствует хорошо

изученному течению в сверхзвуковых диффузорах [6,7]. В аэродинамическом зазоре образуется интенсивная дозвуковая струя, которая при расширении создает небольшую ЛСЗ с максимальным числом Маха $M_{\max} = 1.11$. Следует отметить, что течение имеет нестационарный характер, вызванный колебаниями потока в донной части и следе за капсулой.

Значение скорости $V_{HL} = 300$ м/с (1080 км/ч) было максимальным из рассматриваемого диапазона. Кинетическая энергия набегающего потока была достаточно велика, чтобы над верхней поверхностью капсулы образовалась структура течения, аналогичная соплу Лавалья [6, 7] (рис. 3в). Сверхзвуковая область простирается вдоль всего корпуса капсулы. За кормой образуется система ударных волн в виде маховской конфигурации, переводящей сверхзвуковое течение в дозвуковое. Под днищем капсулы формируется сверхзвуковая струя, которая на выходе в донную область течения образует хорошо известную бочкообразную структуру [7]. Такая структура имеет пульсирующий характер, что дополнительно влияет на нестационарность потока в донной области.

Вместе с тем, следует отметить, что нестационарное течение за кормой и в следе за капсулой оказало слабое влияние на интегральное значение безразмерного коэффициента аэродинамического сопротивления C_x . Отклонения текущих значений от осредненного не превышало 1.5%.

Результаты вычислительных экспериментов дали возможность оценить значения размерной силы аэродинамического сопротивления F_x , действующей на корпус капсулы HYPERLOOP (табл. 1).

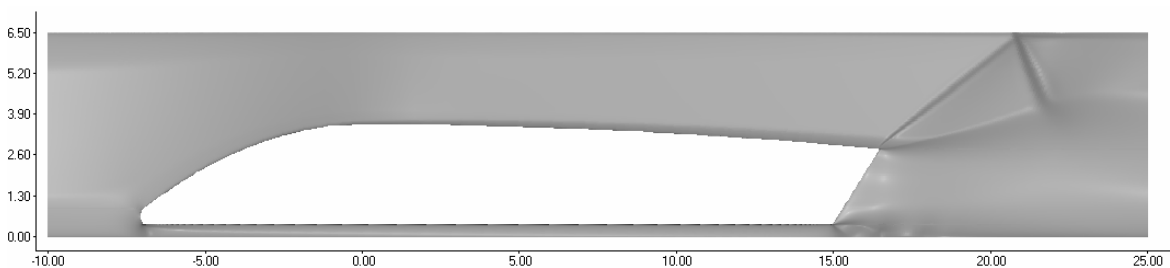
Таблица 1

Оценка силы аэродинамического сопротивления F_x для капсулы HYPERLOOP с диаметром миделевого сечения $D = 3.2$ м

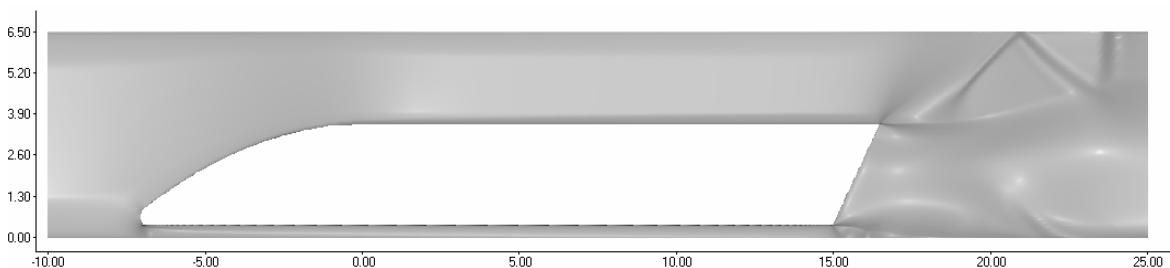
Скорость движения капсулы V_{HL}	Давление воздуха в путепроводе p_{pipe}			
	$1,0 \cdot P_{atm}$	$0,1 \cdot P_{atm}$	$0,01 \cdot P_{atm}$	$0,001 \cdot P_{atm}$
360 км/ч	18.6 кН (1900 кгс)	1.85 кН (189 кгс)	0.184 кН (18.8 кгс)	0.183 кН (1.87 кгс)
720 км/ч	104.0 кН (10600 кгс)	10.4 кН (1057 кгс)	1.03 кН (105 кгс)	0.102 кН (10.4 кгс)
1080 км/ч	355.0 кН (36200 кгс)	35.2 кН (3590 кгс)	3.5 кН (357 кгс)	0.34 кН (35 кгс)

Полученные результаты, позволяют сделать вывод, что при неизменной скорости капсулы сила аэродинамического сопротивления F_x фактически прямо пропорциональна значению давлению воздуха в путепроводе p_{pipe} .

Само значение F_x при постоянной скорости зависит от многих фактов, к числу которых относится и геометрия капсулы. Для иллюстрации влияния формы капсулы на структуру течения были проведены дополнительные расчеты при скорости $V_{HL} = 1080$ км/ч и $p_{pipe} = 0,01 \cdot P_{atm}$ с другой конфигурацией обтекаемого тела. Результаты вычислительных экспериментов представлены на рис.4. Отличие дополнительной конфигурации капсулы состоит в отсутствии сужения к корме, т.е. при одинаковом миделевом сечении кормовая часть капсулы представляет собой цилиндр. Таким образом, при обтекании капсулы недиффузорной геометрии и течение над ней остается дозвуковым (рис. 4б). Однако, в следе за капсулой реализуется система ударных волн с бóльшей интенсивностью, чем для базовой конфигурации (рис. 4а). Вместе с тем донное давление выше, чем в базовом случае, что приводит к некоторому уменьшению значения безразмерного коэффициента аэродинамического сопротивления C_x .



а) базовая геометрия капсулы



б) дополнительный вариант геометрии капсулы

Рисунок 4 – Численные «шлирен-фотографии» течения вблизи капсул HYPERLOOP различной геометрии при $V_{HL} = 1080$ км/ч (300м/с)

Тепловое воздействие на капсулу HYPERLOOP можно иллюстрировать распределениями изменений температуры потока воздуха T относительно

температуры покоящего воздуха T_{pipe} в путепроводе. Разница $\Delta T = T - T_{pipe}$ вблизи обтекаемой капсулы при скорости $V_{HL} = 1080$ км/ч и $p_{pipe} = 0,01 \cdot P_{atm}$ представлена на рис. 5 для значения $T_{pipe} = 288.15$ К (+15°C). Над капсулой возникает поток холодного воздуха, с температурой, не значительно превышающей значение T_{pipe} . Максимальное значение ΔT_{max} составило +104°C. Такая температура наблюдается на верхней стенке путепровода сразу за замыкающим скачком уплотнения, переводящим сверхзвуковой поток в дозвуковой.

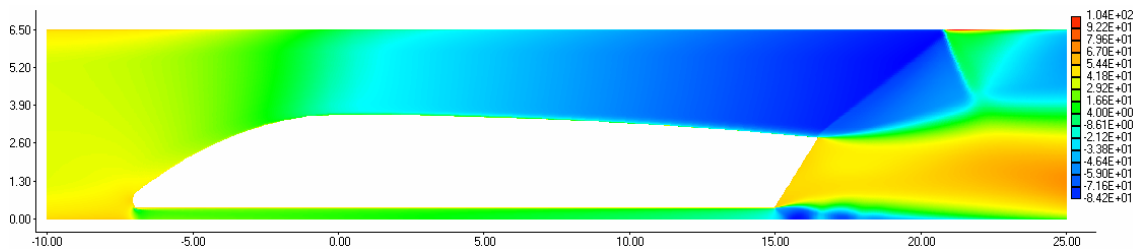


Рисунок 5 – Распределение приращения температуры $\Delta T = T - T_{pipe}$ вблизи капсулы HYPERLOOP при $V_{HL} = 1080$ км/ч (300м/с)

С точки зрения тепловых нагрузок на корпус вакуумированного ВСНТ необходимо рассматривать распределение температуры T_{wall} на поверхности капсулы (рис. 6). Случай скорости $V_{HL} = 1080$ км/ч является самым теплонапряженным из рассмотренного диапазона. Максимальное значение ΔT_{wall} составило +54°C в донной части капсулы. Таким образом, при движении со скоростью 1080 км/ч внешняя оболочка капсулы прогревается до температуры 60÷90° С. Данный уровень тепловой нагрузки может оказать отрицательное влияние на работоспособность бортовых систем электроснабжения и управления, а также на обеспечение комфорта пассажиров в пути.

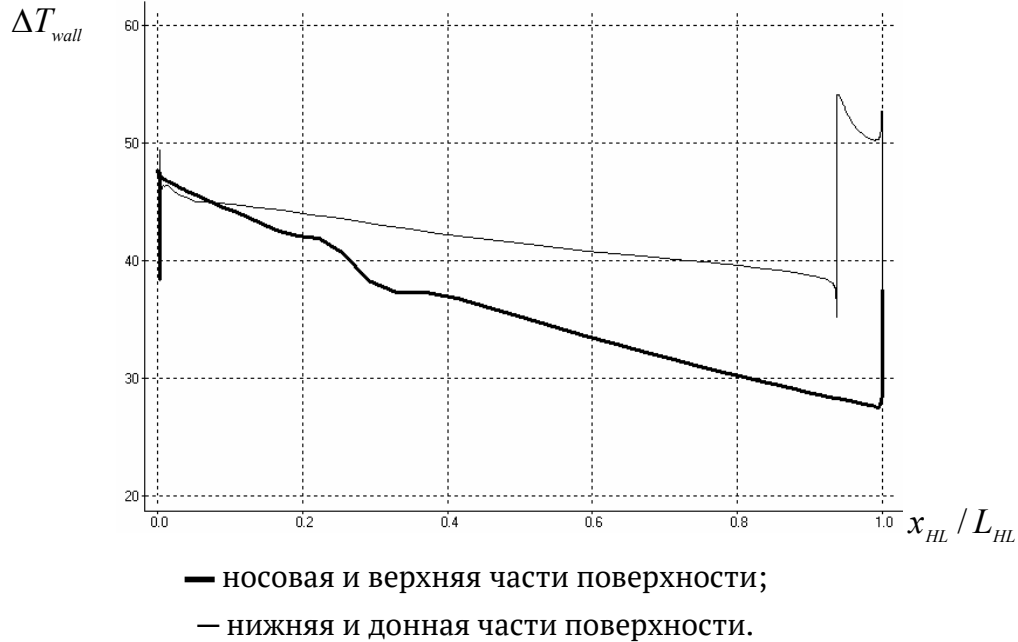


Рисунок 6 – Распределение приращения температуры $\Delta T_{wall} = T_{wall} - T_{pipe}$ на поверхности капсулы HYPERLOOP при $V_{HL} = 1080$ км/ч (300м/с)

Выводы. На основе численного решения уравнений Навье-Стокса сжимаемого газа, замкнутых дифференциальной моделью турбулентности получены поля газодинамических величин вблизи пассажирских капсул ВСНТ HYPERLOOP, движущихся в вакуумированном герметичном путепроводе. Полученные данные по структуре течения и интегральным значениям аэродинамических сил могут использоваться в инженерной практике при проектировании скоростного транспорта нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Hyperloop Transportation Technologies Reveals Full-Scale Passenger Capsule [Text] // Hyperloop Transportation Technologies, Press Kit 02.10.2018 – 4 p.
2. Pulliam T.H. Efficient solution methods for the Navier-Stokes equations [Text] / T.H. Pulliam – Lecture notes for the von Karman Institute for Fluid Dynamics, Von Karman Institute, Belgium, 1985. – 98 p.
3. Полевой О.Б. Численное моделирование управления отрывом сверхзвукового трехмерного потока при обтекании стреловидных углов сжатия [Текст] / О.Б. Полевой, А.А. Приходько // Аэрогидродинамика: проблемы и перспективы. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». – 2006. – С. 101–119.
4. Spalart P.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow [Text] / P.R. Spalart, S.R. Allmaras // AIAA Paper. – 1992. – № 439. – 22 p.

5. Редчиц Д.А. Численное моделирование обтекания турбулентным потоком транспортного средства вблизи экрана [Текст] / Д.А. Редчиц, С. В. Моисеенко // Вестник Херсонского национального технического ун-та. – 2016. Вып. 3(58). – С. 398 – 402.
6. Тимошенко В.И. Теоретические основы технической газовой динамики [Текст] / В.И. Тимошенко – Киев: Наукова думка, 2013. – 432 с.
7. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С.К. Годунов, А.В. Забродин, В.Я. Иванов, А.И. Крайко, Г.П.Прокопов – М.: Наука, 1976. – 400 с.

REFERENCES

1. Hyperloop Transportation Technologies Reveals Full-Scale Passenger Capsule [Text] // Hyperloop Transportation Technologies, Press Kit 02.10.2018 – 4 p.
2. Pulliam T.H. Efficient solution methods for the Navier-Stokes equations [Text] / T.H. Pulliam – Lecture notes for the von Karman Institute for Fluid Dynamics, Von Karman Institute, Belgium, 1985. – 98 r.
3. Polevoi O.B. Chylennoe modelyrovanye upravleniya otryvom sverkhzvukovoho trekhmernoho potoka pry obtekanuy strelovudnykh uhlov szhatyia [Tekst] / O.B. Polevoi, A.A. Prykhodko // Аэрогидродинамика: проблемы у перспектувы. – Kharkov: Nats. аэрокосм. un-t «Khark. avyats. yn-t». – 2006. – S. 101–119.
4. Spalart P.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow [Text] / P.R. Spalart, S.R. Allmaras // AIAA Paper. – 1992. – № 439. – 22 p.
5. Redchyts D.A. Chylennoe modelyrovanye obtekaneya turbulent-nyim potokom transportnoho sredstva vblyzy экрана [Tekst] / D.A. Redchyts, S. V. Moysenko // Vestnyk Khersonskoho natsyonalnoho tekhnicheskoho un-ta. – 2016. Выр. 3(58). – S. 398 – 402.
6. Tymoshenko V.Y. Teoretycheskye osnovy tekhnicheskoi hazovoi dynamyky [Tekst] / V.Y. Tymoshenko – Kyev: Naukova dumka, 2013. – 432 s.
7. Hodunov S.K. Chylennoe reshenye mnohomernykh zadach hazovoi dynamyky [Tekst] / S.K. Hodunov, A.V. Zabrodyn, V.Ia. Yvanov, A.Y. Kraiko, H.P.Prokopov – M.: Nauka, 1976. – 400 s.

Received 18.02.2019.

Accepted 21.02.2019.

Оцінка аеродинамічних та теплових навантажень на корпус капсули HYPERLOOP в вакуумованому шляхопроводі

Проведено математичне моделювання полів течії поблизу пасажирської капсули HYPERLOOP, що рухається при різних значеннях тиску в герметичному вакуумованому шляхопроводі на основі чисельного рішення рівнянь Нав'є-Стокса, замкнутих диференціальною моделлю турбулентної в'язкості. Результати обчислювальних експериментів показали істотну залежність структури течії від швидкості руху та геометрії капсули

при наявності подібності за значенням тиску в шляхопроводі. Отримані результати дозволили провести оцінку сил аеродинамічного опору і нагрівання поверхні капсули.

Redchyts Evaluation of aerodynamic and thermal loads on the HYPERLOOP capsule fuselage in a partly evacuated tube

Aerodynamics occupies an important place in the design of high-speed ground transportation systems. When a vehicle is moving at a speed above 500 km/h under atmospheric pressure, the main energy is spent to overcome the aerodynamic drag. Creating a rarefied atmosphere inside a sealed pipe in order to significantly reduce energy loss is one of the key ideas of the HYPERLOOP project [1].

The paper assesses the aerodynamic and thermal loads on the HYPERLOOP capsule fuselage in a partly evacuated tube based on the numerical solution of the Navier-Stokes equations of compressible flow closed by a differential turbulence model [2-4]. Numerical modeling was carried out with the help of the computational fluid dynamics software developed by the scientific researchers of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine [5].

It was shown that even under conditions of low air pressure in a partly evacuated tube the high-speed movement of the HYPERLOOP capsule will be accompanied by the formation of local supersonic zones, shock waves and non-stationary vortex systems. The structure of the flow essentially depends on geometry of the streamlined capsule and the speed of its movement.

It was found that the flow structure and the values of aerodynamic dimensionless coefficients weakly depend on the pressure in the partly evacuated tube. Thus, the aerodynamic forces acting on the HYPERLOOP capsule at the same speeds are almost directly proportional to the pressure value in the tube.

A certain problem in the design of the HYPERLOOP type high-speed vehicles will be the aerodynamic heating of the capsule fuselage. When the capsule moves at transonic speed the temperature of the outer surface of the capsule will be 60490° C. This heat load can have a negative impact on the performance of onboard power supply and control systems, as well as on the ensuring of the passengers' comfort on the way.

Полевой О.Б. - старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины.

Редчиць Д.А. - ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины.

Польовий О.Б. - старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, Інститут транспортних систем і технологій НАН України.

Редчиць Д.О. - провідний науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, Інститут транспортних систем і технологій НАН України.

Polevoy O.B. - Senior Scientific Researcher, Ph.D., Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Redchyts D.O. - Leading Scientific Researcher, Ph.D. Leading Researcher, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.