

20. **Бенерджи, П.** Метод граничных элементов в прикладных науках / П. Бенерджи, Р. Баттерфилд. — М., 1984. — 494 с.
21. **Бреббия, К.** Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. — М., 1987. — 524 с.
22. **Белоцерковский С.М.** Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / С.М. Белоцерковский, В.Н. Котовский, М.И. Ништ, П.М. Федоров. — М., 1988. — 309 с.
23. **Белоцерковский С.М.** Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей / С.М. Белоцерковский, А.С. Гиневский. — М., 1995. — 355 с.
24. **Chorin A.** Vorticity and Turbulence / A. Chorin. — New York, Springer-Verlag, 1994. — 173 p.
25. **Melnikov Yu.A.** Influence Function and Matrices / Yu.A. Melnikov. — New York, Boston: Marcel Dekker, 1999. — 470 p.
26. **Melnikov Yu.A.** Influence Function Approach / Yu.A. Melnikov. — Southampton, Boston: WIT Press, 2008. — 369 p.
27. **Евдокимов Д.В.** Использование функций Грина в методах сингулярных граничных интегральных уравнений / Д.В. Евдокимов, Н.В. Поляков // «Метод дискретных особенностей в задачах аэродинамики, электродинамики и теории дифракции». Труды VII Международного симпозиума «Метод дискретных особенностей в задачах математической физики», 26 — 29 июня 1997, Феодосия. — С. 62 — 65.
28. **Лагалли М.** Идеальные жидкости / М. Лагалли // Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. Под редакцией Ф. Франка и Р. Мизеса. Ч. 2. — М., 1937. — С. 346 — 438.
29. **Дидинская Е.О.** Гомотетичный рост ансамбля пузырей (капель) / Е.О. Дидинская, А.В. Дидинский, Д.В. Евдокимов, А.А. Кочубей // Вестник ХНТУ. — 2010, № 3 (39). — С. 153 — 158.

Надійшла до редколегії 22.10.13.

УДК 532.517

А.А. Кочубей, Е.В. Кравец

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТРЕХМЕРНЫХ КАВЕРНАХ

Проведено аналіз експериментальних і чисельних досліджень нестисливих течій в'язкої рідини в просторових кавернах різних конфігурацій. Розглянуто особливості проведення експериментів і застосування чисельних методів. Показано вплив торцевого ефекту і утворення специфічних тривимірних вихрових структур. Приведено результати розрахунку методом скінченних елементів течій в'язкої нестисливої рідини між призмами над екраном у випадку відкритого міжторцевого простору і за наявності перемички між торцями, що моделюють течію в міжвагонному проміжку при русі швидкісного залізничного складу.

Ключові слова: тривимірна каверна, в'язка нестислива рідина, циркуляційна течія, експеримент, чисельні методи, торцевий ефект, міжторцевий простір (каверна) над екраном відкритий і з перемичкою.

Проведен анализ экспериментальных и численных исследований несжимаемых течений вязкой жидкости в пространственных кавернах различных конфигураций. Рассмотрены особенности проведения экспериментов и применения численных методов. Показано влияние торцевого эффекта и образование специфических трехмерных вихревых структур. Приведены результаты расчета методом конечных элементов течения вязкой несжимаемой жидкости между призмами над экраном в случае открытого межторцевого пространства и при наличии перемычки между торцами, моделирующих течение в межвагонном промежутке при движении скоростного железнодорожного состава.

Ключевые слова: трехмерная каверна, вязкая несжимаемая жидкость, циркуляционное течение, эксперимент, численные методы, торцевой эффект, межторцевое пространство (каверна) над экраном открытое и с перемычкой.

The analysis of experimental and numerical researches of viscous incompressible flows in three-dimensional cavities of various configurations is carried out. The features of experimental researches realization and use of numeral methods are considered. Influence of butt-end effect and formation of specific three-dimensional vortical structures are established. There are calculation results by finite elements method of a viscous incompressible liquid flow in open inter-end space and with the crosspiece between the ends of prisms, which models the flow in an intercarload interval when the high-speed train moving.

Key words: three-dimensional cavity, viscous incompressible liquid, circulation flow, experiment, numeral methods, butt-end effect, inter-end space (cavity) above a screen is opened and with a crosspiece.

Введение. Задача течения вязкой несжимаемой жидкости в каверне используется исследователями, в основном, как тестовая при отладке численных алгоритмов [2 – 3; 15 – 16; 21 – 22; 24 – 25; 41 – 44; 46; 48]. Однако она может представлять интерес и в качестве прикладной задачи: как по обтеканию каверн, вызванных коррозионными процессами на поверхностях деталей и конструкций, так и по особенностям геометрии их внешних обводов [25 – 30]. Во всех случаях представляет интерес методика расчета течения в кавернах, а также становится актуальным определение вихревой структуры течения с целью изучения особенностей гидродинамики обтекания, в частности, распределения интегральных характеристик на стенках каверны.

Сравнительный анализ теоретических и численных двумерных моделей течения в кавернах с различной геометрией приведен в [24]. Рассмотрены особенности течений в кавернах с полностью и частично подвижной крышкой (симметрично и несимметрично расположенной относительно центральной вертикальной оси каверны); в открытых кавернах (с учетом течения со стороны отсутствующей подвижной крышки, а также одновременно со стороны отсутствующих крышки и дна каверны с учетом близко расположенной стенки-экрана со стороны дна каверны).

1. Экспериментальные исследования. Пространственные эффекты в ряде случаев могут существенно влиять на картину течения несжимаемой жидкости. Поэтому решения, полученные при использовании двумерных приближений, значительно отличаются от экспериментальных данных – от их трехмерных аналогов. Исключением не является и течение в каверне. Наличие торцевых стенок и ограниченность ширины выемки вызывают значительную перестройку течения в сравнении с плоским случаем, что приводит к образованию совершенно новых структур (вихри типа Тейлора-Гертлера, например).

Большинство экспериментальных исследований, посвященных задаче течения жидкости в каверне с учетом движения внешнего потока, характеризуются простыми наблюдениями [8; 46; 55 – 56].

Визуализация течения путем введения краски осуществлялась в работе [43], где исследовалась структура потока в траншеях прямоугольного сечения при изменении глубины, ширины и длины траншеи в широких пределах. В работе

обращается внимание на ячеистую структуру потока, причем ячеистый характер течения существенно зависит от глубины и длины траншеи и практически не зависит от ширины.

Одной из первых работ, посвященных количественному исследованию движения жидкости в задаче с резко меняющейся геометрией, является [32], где изучалось течение воды на горизонтальном лотке с порогом. Результатом измерений явились профили скоростей в области резкого увеличения глубины.

Fox [36 – 37] исследует вопросы устойчивости течения в траншеях.

Авторами работы [40] также была замечена ячеистая структура течения при проведении многочисленных измерений статического давления для различных соотношений геометрических размеров траншеи. В работе отмечается, что в случае соприкосновения двух смежных ячеек происходит их слияние, затем они движутся в сторону, противоположную основному направлению потока. Исследование взаимодействия ячеек между собой осуществлялась визуально при помощи диффузии дыма.

Результаты экспериментальных исследований течений в трехмерной каверне с подвижной крышкой приведены в [41 – 42], где основное внимание уделено механизму образования специфических трехмерных циркуляционных систем: угловых вихрей вблизи торцевых стенок каверны, а также вихрей типа Тейлора-Гертлера, количество и интенсивность которых возрастают с ростом скорости движения крышки.

Имеющиеся количественные данные [44; 51 – 52], как правило, основаны на использовании обычного термоанемометра, который не является чувствительным к изменению направления вектора скорости. Поскольку течение в каверне при больших числах Рейнольдса характеризуется наличием в центральной ее части и вблизи углов областей с малыми значениями осредненной скорости и большими величинами турбулентных пульсаций, то использование обычного термоанемометра для измерений в таких областях течения может давать неверные результаты, так как указанные особенности течения приводят в отдельные фиксированные моменты времени к изменению направления мгновенного вектора скорости на противоположное.

Указанный недостаток устраняется в работе [9] применением фазоинвертирующего термоанемометра [10 – 11]. Авторами обнаружено, что повышение интенсивности турбулентности во внешнем потоке приводит к увеличению скорости циркуляционного течения в полости, а также ведет к возрастанию турбулентных пульсаций скорости. Отмечено также, что величина продольного интегрального масштаба турбулентности внутри полости не зависит от интенсивности внешней турбулентности и соответствует значению на нижней границе слоя смешения течения в полости с внешним течением. Не влияет интенсивность турбулентности внешнего потока и на процессы, происходящие в пограничном слое на дне полости. Так, профиль осредненной скорости в упомянутом пограничном слое не зависит от уровня турбулизации внешнего течения и, несмотря на высокую интенсивность турбулентности внешнего течения, удовлетворительно описывается ламинарным профилем Блазиуса [34].

В [51] были измерены как инерционные характеристики – построены профили продольной и поперечной компонент скорости в средних сечениях каверны, так и динамические – приведено распределение давления на стенках и дне полости. Tanі [52] исследовал турбулентное течение в каверне; результатом явились профили распределения средней скорости, напряжения турбулентного трения и интенсивности турбулентности в вертикальных сечениях, параллельных боковым стенкам траншеи. В работе [44] приведен результат измерения скоростей в двух сечениях траншеи.

В экспериментах работ [12 – 13] с помощью фазоинвертирующего термоанемометра [10 – 11] измерялись распределения скорости, степени и масштаба турбулентности в слое смещения и по высоте выемки, а также профили продольной осредненной и пульсационной составляющих скорости в пограничном слое на дне выемки.

Кроме работы [9] исследованию влияния степени турбулентности внешнего течения на процессы в струйном слое смещения посвящены работы [14; 47]. Работы [4, 33] касаются изучения распределения скоростей и давлений в пристенном пограничном слое при различных числах Рейнольдса.

В работе [23] подчеркивается, что механизм обмена массой и энергией между вихревым и основным течением в квадратной траншее заключается в периодических выбросах из вихря массы, обладающей малым импульсом, а также переноса массы, обладающей большим импульсом, из основного потока в циркулирующий в траншее вихрь через верхнюю его границу.

Экспериментальное влияние торцевых стенок на вихревое течение в траншее квадратного сечения проводилось авторами работы [5]. Измерение полей скорости во всем объеме траншеи и по толщине пограничного слоя на боковых стенках и дне траншеи проводилось с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости, разработанного в ИАЭ СО АН СССР. Обнаруженное несоответствие расходов во входящем и исходящем в траншею потоках, а также отличие профилей скорости в области пристенной струи позволяют говорить о значительном влиянии ширины траншеи на структуру течения в траншее.

Экспериментальное исследование течения вязкой несжимаемой жидкости в траншее квадратного поперечного сечения при ламинарном и турбулентном режимах [6], также проведенное с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости, подтверждает классическую схему течения в каверне: в центральной части траншеи обнаружено ядро с постоянной завихренностью, вдоль стенок траншеи распространяется пристенная струя, а в углах траншеи существуют вторичные вихри.

Перечисленные выше исследования ограничиваются экспериментальным определением лишь скорости и статического давления на стенках и во внутреннем объеме каверны. Определению трения на стенках траншеи, как при ламинарном движении жидкости в канале, так и при турбулентном режиме, посвящена работа [45].

Измерение касательного напряжения на стенках траншеи проводилось и в работе [7] с использованием электродиффузионного метода на гидродинамической установке. Изучение вихревого движения сопровождалось широким диапазоном изменения чисел Рейнольдса и относительной высоты траншеи. С целью исключения торцевых эффектов траншея была образована внезапным осесимметричным расширением трубы с последующим резким уменьшением сечения до первоначальной величины.

Изучению ячеистых трехмерных структур при обтекании траншей дозвуковым потоком посвящены работы [39; 53]. В [53] показано влияние геометрических размеров траншеи (высоты D , ширины W и длины L) на формирование ячеек в потоке. Получено, что при турбулентном обтекании с $Re = (2 \div 8) \cdot 10^4$ траншеи для $D/L = 0.66$ количество образующихся ячеек зависит от соотношения относительной длины W/L траншеи. Так, при четных значениях $W/L = 2, 4, 6$ количество ячеек также является четным, и в траншее реализуется симметричная картина течения. В противном случае течение являлось несимметричным, а в потоке, кроме обычного ряда ячеек, была замечена одна ячейка меньшего размера.

Интерес представляет работа [54], в которой исследуется гидродинамика течения в трехмерной прямоугольной каверне, грани которой расположены под

некоторым углом относительно вектора скорости набегающего потока. В работе приведено распределение давления в каверне с отношением длины к ширине 2:1 и различных значениях высоты при обтекании дозвуковым потоком с $Re = (2 \div 5) \cdot 10^4$.

2. Численные методы. Каверна с крышкой. Известно [57], что течение в трехмерной каверне не только количественно, но и качественно отличается от его двумерного аналога. Однако, имеющиеся работы по численному исследованию трехмерных вязких несжимаемых течений в кавернах представлены в незначительном количестве и ограничены возможностями вычислительной техники в связи с резко возрастающими в таких задачах затратами машинного времени и памяти ЭВМ.

Метод конечных разностей (МКР). В работе [2], где рассмотрено течение в трехмерной каверне $H:B:L$ (высота-ширина-длина) при 1:1:1, 1:1:2, 1:1:3 (рис. 1) подчеркивается существенное влияние пространственных эффектов на картину течения несжимаемой жидкости. Указывается, что наличие торцевых стенок и ограниченность ширины выемки вызывают значительную перестройку течения в сравнении с плоским случаем: наряду с основным центральным вихрем и вторичными вихрями 1, 3 и 4, существующими в каверне при плоской постановке, в трехмерной каверне возникают угловые вихри 2 и вихри Тейлора-Гертлера.

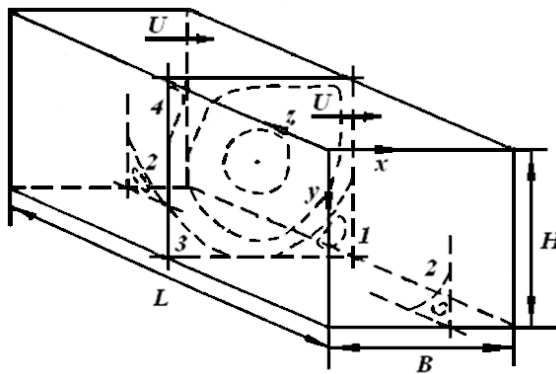


Рис. 1. Геометрия пространственной каверны с крышкой и схема образования вихрей [2]

В [3] приводятся результаты расчетов нестационарного сдвигового течения вязкой несжимаемой жидкости в полости с одной и двумя движущимися горизонтальными гранями для различных геометрий и чисел Рейнольдса до 5000. Трехмерные нестационарные уравнения Навье-Стокса решались методом конечных разностей при использовании схемы второго порядка точности с разностями «против потока» для аппроксимации конвективных членов. В работе описаны особенности преобразования расчетной области задачи и вычислительного алгоритма, связанные с распараллеливанием решения на многопроцессорной ЭВМ.

Сравнение результатов решения задачи, полученных для плоской и пространственной постановок, показывает снижение скоростных характеристик для трехмерной полости, обусловленное энергетическими затратами на преодоление трения вблизи торцевых стенок, отсутствующих в двумерной формулировке задачи. Наличие торцевых стенок полости с движущейся верхней гранью приводит к формированию угловых вихрей, вызывающих вращательное движение, распространяющееся вглубь полости. Это явление приводит к образованию вихрей Тейлора-Гертлера, замеченных при $Re = 3200$ в нижней части поперечного сечения $X = 0.766$ вблизи задней стенки полости $1 \times 3 \times 1$ (рис. 2). Эти вихри образуются

парами, рождаются, исчезают и эволюционируют с течением времени непериодическим образом (рис. 3).

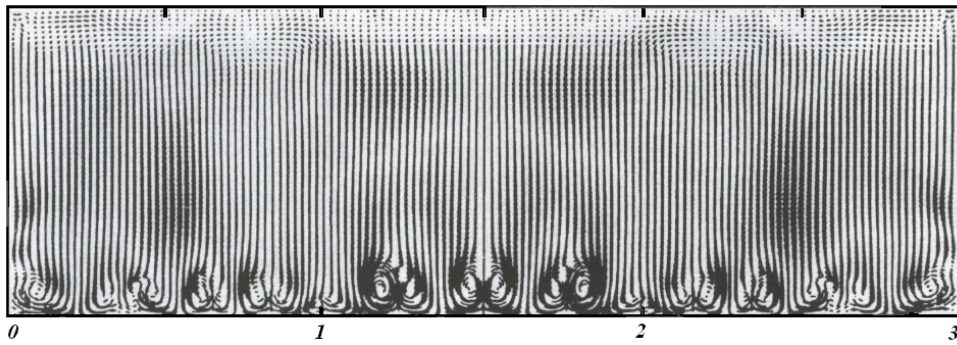


Рис. 2. Зарождение вихрей Тейлора-Гертлера
вблизи задней стенки полости с подвижной крышкой [3]

Отмечается, что для кубической полости вихри Тейлора-Гертлера слабо развиты. Более устойчивыми являются аналогичные образования в полости с расширением 3:1 поперек потока, в которой замечено появление новой пары вихрей не только за счет влияния торцевых стенок, но и в результате деления старой пары вихрей на две и движения их в сторону торцевых стенок.

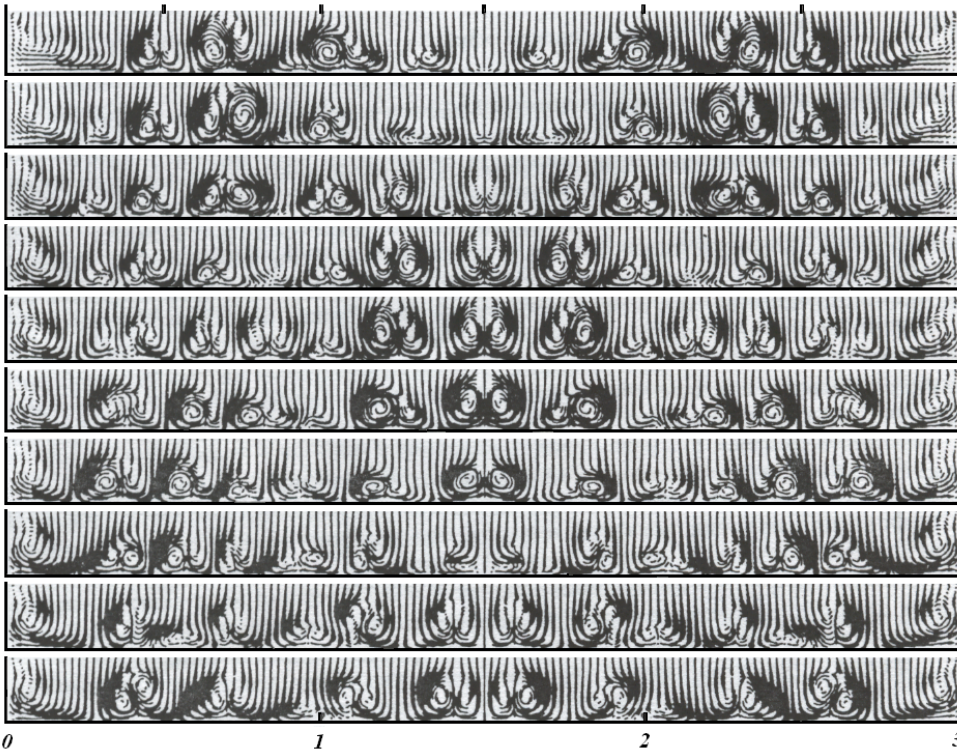


Рис. 3. Эволюция вихрей Тейлора-Гертлера в полости с подвижной крышкой [3]

В полости ($H/L = 0.1$) с двумя разнонаправленно движущимися крышками при $Re = 5000$ замечено появление вихрей Тейлора-Гертлера как вблизи подвижного дна полости, так и в окрестности верхней крышки (рис. 4: а – $Y = 1/2$; б – $Y = 1/16$; в – $X = 1/2$; г – $X = 7/8$; д – $X = 15/16$).

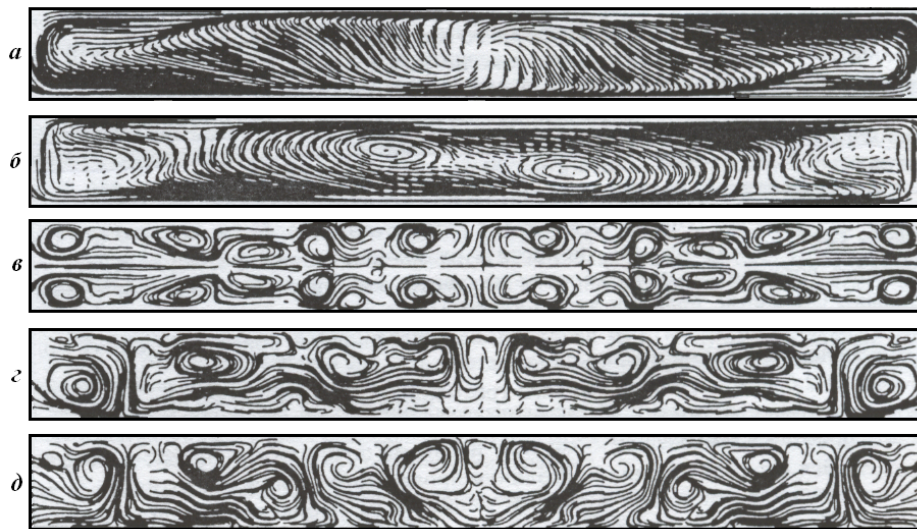


Рис. 4. Образование вихрей Тейлора-Гертлера
в полости с двумя разнонаправленными крышками [3]

Распараллеливание решения с целью снижения временных затрат используется и в работе [15] при решении разностного аналога системы квазигидродинамических уравнений. Подробно рассматривается параллельный вариант решения уравнения Пуассона для давления. Приведены результаты расчетов в каверне для $Re = 100$ и 1000 на последовательности сгущающихся сеток.

Результаты анализа ламинарного циркуляционного течения в квадратной и кубической кавернах с подвижной крышкой/гранью при высоких числах Рейнольдса (до 40 000) приводятся в работах Исаева С.А. [16; 21 – 22]. Здесь же показаны этапы совершенствования методов решения разностных уравнений и алгоритмов расчетных схем на примере задачи течения в каверне. В [16] даны результаты тестирования специализированного (VP2/3) и универсального (FLUENT) пакетов прикладных программ гидродинамического и теплофизического профиля.

Метод конечных элементов (МКЭ). В работе [48] решена сопряженная задача гидродинамики и теплообмена, исследована структура конвективных потоков в каверне с крышкой. Результаты получены с применением метода конечных элементов для задачи в плоской постановке и обобщены для многомерных задач с помощью идеи метода расщепления по пространственным переменным.

Методы штрафных функций и конечных элементов. В отличие от приведенных выше работ, где давление в расчетной области определялось при использовании уравнения неразрывности или из уравнения Пуассона, в работах [35; 49] для этой цели используется метод штрафных функций, а численный расчет осуществляется методом конечных элементов.

3. Численные методы. Открытая каверна. Одним из первых численных результатов решения задачи течения вязкой несжимаемой жидкости в трехмерной каверне является работа [38]. При помощи прямого численного моделирования было проведено исследование структуры течения в прямоугольных кавернах с отношением длины к высоте $L/D = 1, 2, 4$ и относительной шириной $W/D = 3$ при обтекании ламинарным потоком с $Re = 10^3 \div 10^4$. В работе показано влияние толщины пограничного слоя во входном сечении расчетной области, а также воздействие образующихся вихрей Тейлора-Гертлера на формирование вихревой структуры течения в каверне.

Методом конечных разностей выполнены исследования Исаева [1; 17 – 20], посвященные изучению вязкого несжимаемого ламинарного и турбулентного течения при обтекании симметричной и несимметричной лунки, расположенной на плоскости, а также на стенке плоского канала постоянного прямоугольного сечения. Лунка может рассматриваться как разновидность открытой каверны со скругленными острыми кромками. Построение разностного аналога исходной системы уравнений осуществлялось конечно-объемным методом, а уравнения Рейнольдса для турбулентного течения замыкались с помощью модели турбулентности Ментера.

В целях уменьшения затрат машинного времени и памяти ЭВМ в работе [31] предлагается асимптотический метод расчета, базирующийся на идее моделирования трехмерного течения в каверне при помощи обтекания трехмерным потоком двумерной бесконечной каверны. В работе представлены результаты расчета турбулентным потоком при $Re = 3.4 \cdot 10^3$ каверны с отношениями $L/D = 2$, $W/D = 6$. Детально изучено поведение пульсационной составляющей скорости в потоке, показано достаточное согласование с имеющимися аналогичными результатами в [50].

Метод конечных элементов применяется в работах [24 – 30], где приводится решение задачи о турбулентном течении вязкой несжимаемой жидкости в открытой и частично перекрытой каверне без дна над экраном в пространственной постановке (рис. 5, 9).

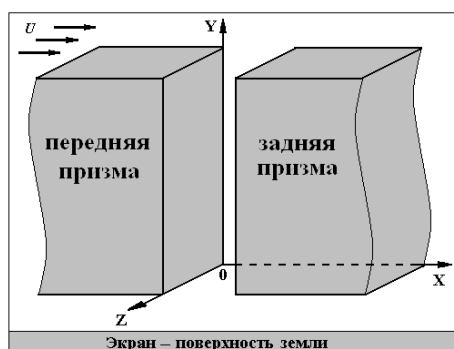


Рис. 5. Схема обтекания призмы без перекрытия

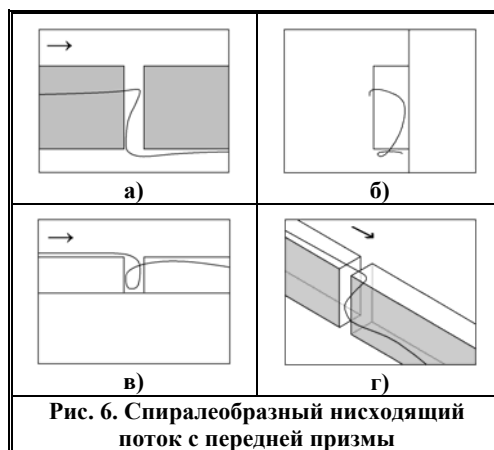


Рис. 6. Спиралеобразный нисходящий поток с передней призмы

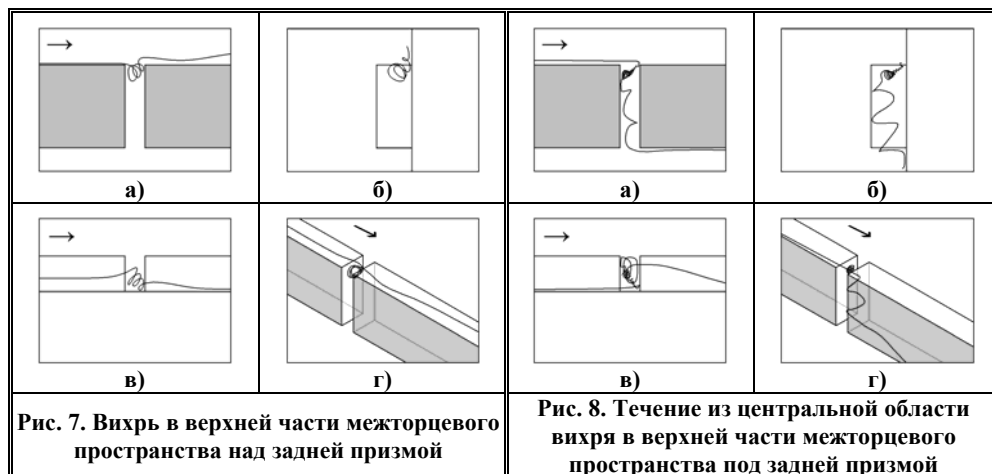


Рис. 7. Вихрь в верхней части межторцевого пространства над задней призмой

Рис. 8. Течение из центральной области вихря в верхней части межторцевого пространства под задней призмой

Каверна моделювалась обтеканием межторцевого пространства двух призм, расположенных тандемом, с учетом влияния экрана. Для расчета турбулентного движения система осредненных уравнений Рейнольдса замыкалась уравнениями $k-\varepsilon$ модели турбулентности с применением пристеночных функций вблизи неподвижных границ каверны.

Влияние частичного перекрытия на изменение структуры течения в каверне без дна над экраном в трехмерном случае расчета приведено на рис. 6 – 8, 10 – 12. На рисунках буквами обозначены виды (относительно входного сечения): а – сбоку, б – спереди, в – сверху, г – изометрия.

Анализ структуры течения между призмами без перекрытия (рис. 5) показал существование спиралеобразного нисходящего потока с верхней грани передней призмы (рис. 6), описывающего виток в межторцевом пространстве и уходящего под нижнюю грань задней призмы; а также наличие вихревого движения в верхней части межторцевого пространства, уходящего на верхнюю грань задней призмы (рис. 7). Течение из центральной области вихря в верхней части межторцевого пространства показано на рис. 8.

Наличие перемычки между торцами призм (рис. 9) перестраивает структуру течения в межторцевом пространстве, формируя восходящее спиральное течение (рис. 10), а также спиральные структуры над верхней гранью перемычки (рис. 11) и под нижней ее гранью (рис. 12).

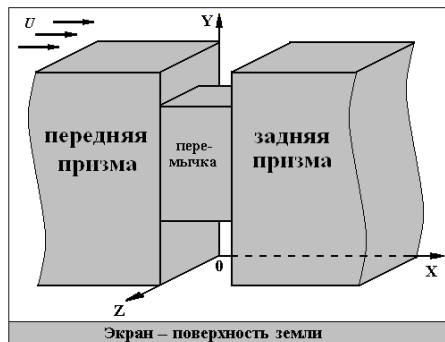


Рис. 9. Схема обтекания призм с перемычкой

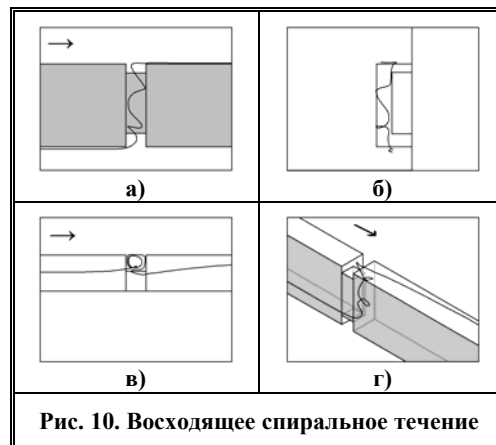


Рис. 10. Восходящее спиральное течение

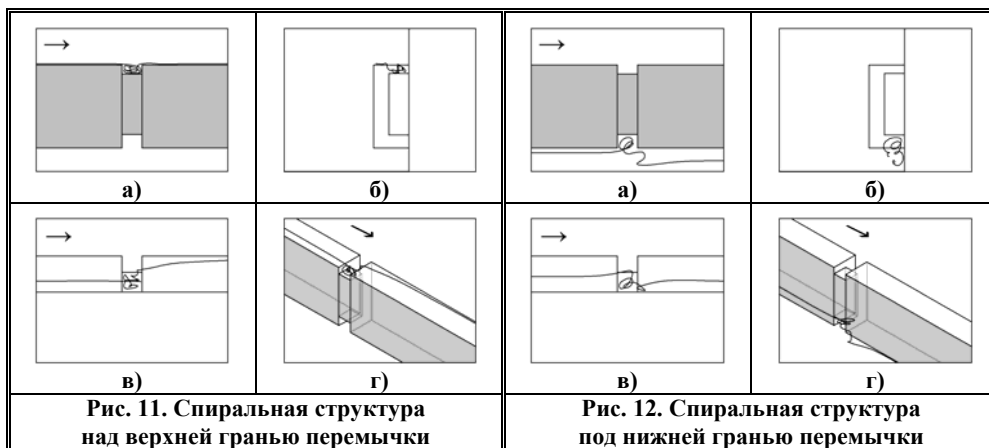


Рис. 11. Спиральная структура над верхней гранью перемычки

Рис. 12. Спиральная структура под нижней гранью перемычки

Получено, что наличие перемычки снижает коэффициент аэродинамического сопротивления межторцевого пространства в 1,7 раза со значения $C_x = 0.026$ для открытого межторцевого пространства до $C_x = 0.015$ для пространства с перемычкой.

Таким образом, анализ результатов задачи обтекания двух призм над экраном показал существование сложной пространственной системы вихрей и потоков в межторцевом пространстве, которая не может быть получена при решении аналогичной двумерной задачи.

Выводы. Проведенный анализ исследований задач внутреннего и внешнего течений несжимаемой жидкости в каверне позволил установить следующее.

1. Экспериментальными исследованиями выявлено существование угловых вихрей в нижней части торцевых стенок и вихрей Тейлора-Гертлера вблизи дна каверны – специфических трехмерных вихревых структур, отсутствующих при решении задач в плоской постановке.

2. Численные методы являются наиболее универсальным методом решения задач динамики жидкости. Вычислительную неустойчивость алгоритма, связанную с расчетом течений при больших числах Рейнольдса, уменьшают применением неравномерных сеток со сгущением вблизи неподвижных стенок, а также использованием схем повышенного порядка точности.

3. Сравнение результатов решения задач течения в каверне при плоской и пространственной постановках позволяет утверждать, что двумерное численное моделирование дает профили средней скорости, значительно отличающиеся от измеренных в экспериментах и полученных численно в плоскости симметрии пространственной задачи. Трехмерный характер течения обусловлен наличием торцевых стенок, которые приводят к дополнительной потере энергии на трение и, тем самым, к ослаблению течения.

Библиографические ссылки

1. Баранов П.А. Численное и физическое моделирование циркуляционного течения в вихревой ячейке на стенке прямого канала / П.А. Баранов, С.В. Гувернюк, М.А. Зубин, С.А. Исаев // Изв. РАН. – Сер. МЖГ. – 2000. – № 5. – С. 44 – 56.
2. Белолипецкий В.М. Численное исследование рециркуляционных течений в трехмерной каверне / В.М. Белолипецкий, В.Ю. Костюк // Ж. прикл. мех. и техн. физики. – 1990. – № 1. – С. 100 – 104.
3. Бессонов О.А. Численное моделирование трехмерного сдвигового течения в полости с движущимися крышками / О.А. Бессонов, В.А. Брайловская, Б. Ру // Изв. РАН. – Сер. МЖГ. – 1998. – № 3. – С. 41 – 49.
4. Блэр М. Влияние турбулентности невозмущенного потока на переход в пограничном слое при положительных градиентах давления / М. Блэр // Тр. амер. о-ва инж.-мех. – Энергетические машины и установки. – 1982. – Т. 104. – № 4. – С. 23 – 31.
5. Богатырев В.Я. О торцевых эффектах в траншеях прямоугольного поперечного сечения / В.Я. Богатырев, А.В. Горин // Градиентные и отрывные течения. – Новосибирск. – 1976. – С. 132 – 139.
6. Богатырев В.Я. Экспериментальное исследование течения в траншее / В.Я. Богатырев, Ю.Н. Дубнищев, В.А. Мухин, В.Е. Накоряков, В.С. Соболев, Е.Н. Уткин, Н.Ф. Шмойлов // ПМТФ. – 1976. – № 2. – С. 76 – 86.
7. Богатырев В.Я. Экспериментальное исследование касательного напряжения на стенках траншеи / В.Я. Богатырев, В.А. Мухин // Градиентные и отрывные течения. – Новосибирск. – 1976. – С. 117 – 131.

8. **Божков В.М.** Экспериментальное изучение рециркуляционных течений в прямоугольных канавках / В.М. Божков // Ученые записки ЦАГИ. – 1967. – Т. IV. – № 1. – С. 1073 – 1082.
9. **Бормусов А.А.** Влияние внешней турбулентности на течение в прямоугольной полости / А.А. Бормусов, Г.А. Глебов, А.Н. Щелков, Р.А. Яушев // Механика жидкости и газа. – 1986. – № 2. – С. 162 – 166.
10. **Бормусов А.А.** Измерение характеристик высокотурбулентных потоков / А.А. Бормусов, Р.Н. Габитов, Г.А. Глебов, А.П. Козлов, А.Н. Щелков – В кн.: Пристенные турбулентные течения. – Новосибирск. – 1984. – 256 с.
11. **Бормусов А.А.** Фазоинвертирующий термоанемометр, чувствительный к направлению потока / А.А. Бормусов, Р.Н. Габитов, Г.А. Глебов // Приборы и техника эксперимента. – 1984. – № 3. – С. 221 – 223.
12. **Варфоломеев И.М.** Структура турбулентного отрывного течения в прямоугольной полости / И.М. Варфоломеев, Г.А. Глебов, Ю.Ф. Гортышов, А.Н. Щелков, Р.А. Яушев // Пристенные струйные потоки. – Новосибирск. – 1984. – С. 86 – 92.
13. **Варфоломеев И.М.** Структура и характеристики турбулентного отрывного течения в полости / И.М. Варфоломеев, Г.А. Глебов, Ю.Ф. Гортышов, и др. // Инженерно-физический журнал. – 1985. – Т. 48. – № 3. – С. 387 – 391.
14. **Власов Е.В.** Прямые и косвенные методы экспериментального обнаружения когерентной структуры турбулентных струй / Е.В. Власов, А.С. Гиневский, Р.К. Каравосов // В сб.: Механика турбулентных потоков. – М. – 1980. – С. 206 – 219.
15. **Елизарова Т.Г.** Численное моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в кубической каверне / Т.Г. Елизарова, О.Ю. Милокова // Ж. выч. мат. и матем. физики. – 2003. – Т. 43. – № 3. – С. 453 – 466.
16. **Исаев С.А.** Комплексный анализ моделей турбулентности, алгоритмов и сеточных структур при расчете циркуляционного течения в каверне с помощью пакетов программ VP2/3 и FLUENT. Часть 1. Влияние схемных факторов / С.А. Исаев, П.А. Баранов, Н.А. Кудрявцев, Д.А. Лысенко, А.Е. Усачов // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12. – № 4. – С. 587 – 608.
17. **Исаев С.А.** Идентификация самоорганизующихся вихревых структур при численном моделировании ламинарного пространственного обтекания лунки на плоскости потоком вязкой несжимаемой жидкости / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, Д.П. Фролов, и др. // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. – № 6. – С. 6 – 12.
18. **Исаев С.А.** Идентификация самоорганизующихся смерчеобразных структур при численном моделировании турбулентного обтекания лунки на плоскости потоком вязкой несжимаемой жидкости / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, П.А. Баранов // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – № 1. – С. 30 – 37.
19. **Исаев С.А.** Идентификация самоорганизующихся струйно-вихревых структур при численном моделировании ламинарного течения и теплообмена в окрестности несимметричной уединенной лунки / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, А.Е. Усачов, и др. // Изв. РАН. – Сер. Энергетика. – 1999. – № 2. – С. 125 – 135.
20. **Исаев С.А.** Численный анализ влияния вязкости на вихревую динамику при ламинарном отрывном обтекании лунки на плоскости с учетом ее асимметрии / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, П.А. Баранов, Х.Т. Метов, А.Е. Усачов // ИФЖ. – 2001. – Т. 74. – № 2. – С. 62 – 67.
21. **Исаев С.А.** Численное моделирование ламинарного циркуляционного течения в квадратной каверне с подвижной границей при высоких числах Рейнольдса / С.А. Исаев, А.Г. Судаков, Н.Н. Лучко, Т.В. Сидорович // ИФЖ. – 2002. – Т. 75. – № 1. – С. 54 – 60.
22. **Исаев С.А.** Численное моделирование ламинарного циркуляционного течения в кубической каверне с подвижной гранью / С.А. Исаев, А.Г. Судаков, Н.Н. Лучко, и др. // ИФЖ. – 2002. – Т. 75. – № 1. – С. 49 – 53.
23. **Калинин Э.К.** Интенсификация теплообмена в каналах / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярхо – М.: Машиностроение, 1972. – 253 с.

24. **Кочубей А.А.** Сравнительный анализ численных и аналитических исследований циркуляционных двумерных течений в кавернах / А.А. Кочубей, Е.В. Кравец // Техническая механика. – 2012. – № 1. – С. 38 – 55.
25. **Кравец Е.В.** Гидродинамика течения между прямоугольными призмами, расположенными тандемом над экраном: дисс. на соиск. канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 / Кравец Елена Владимировна. – Днепропетровск, 2009. – 229 с.
26. **Кравец Е.В.** Влияние типа обтекателя на аэродинамическое сопротивление межвагонного пространства скоростного поезда / Е.В. Кравец // Вісник Дніпропетр. ун - ту. Серія «Механіка». – 2006. – Вып. 10. – Том 1. – № 2/1. – С. 113 – 119.
27. **Кравец Е.В.** Влияние частичного перекрытия межторцевого пространства на структуру образования вихревой системы при обтекании вязким несжимаемым потоком прямоугольных призм, расположенных тандемом над экраном / Е.В. Кравец // Вісник Дніпропетр. ун - ту. Серія «Механіка». – 2012. – Вып. 16. – Том 1. – № 5. – С. 43 – 50.
28. **Кравец Е.В.** Математическое моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой среды в межвагонном пространстве с крышным обтекателем / Е.В. Кравец // Вісник Дніпропетр. ун - ту. Серія «Механіка». – 2005. – Вып. 10. – Том 1. – № 10/1. – С. 66 – 73.
29. **Кравец Е.В.** Сравнительный анализ течения в открытом и частично перекрытом межвагонном пространстве при движении скоростного поезда / Е.В. Кравец // Вісник Дніпропетр. ун - ту. Серія «Механіка». – 2004. – Вып. 8. – Том 1. – № 6. – С. 26 – 33.
30. **Кравец Е.В.** Численное моделирование пространственного течения воздуха в межвагонном промежутке при скоростном движении поезда / Е.В. Кравец // Вісник Дніпропетр. ун - ту. Серія «Механіка». – 2008. – Вып. 11. – Том 1. – № 5. – С. 49 – 60.
31. **Савельев А.Д.** О влиянии задней кромки каверны на интенсивность пульсаций потока / А.Д. Савельев // Известия РАН, Механика Жидкости и Газа. – 2001. – № 3. – С. 79 – 89.
32. **Фидман Б.А.** Поле скоростей в водном потоке при внезапном увеличении глубины / Б.А. Фидман // Изв. АН СССР, сер. техн. наук. – 1953. – № 4. – С. 221 – 230.
33. **Хэнкок Т.** Влияние турбулентности невозмущенного потока на характеристики турбулентных пограничных слоев / Т. Хэнкок, П. Брэдшоу // Тр. амер. о-ва инж.-мех. – Теорет. основы инж. расчетов. – 1983. – Т. 105. – № 3. – С. 126 – 133.
34. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
35. **Dhatt G.** A study of penalty elements for incompressible laminar flows / G. Dhatt, G. Hubert // Int. J. for Num. Meth. in Fluids – 1986. – V. 6. – P. 1 – 19.
36. **Fox J.** A Criterion for the Transition between Flow Regimes in Turbulent Cavity Flow / J. Fox // AIAA J. – 1966. – Vol. 4. – № 2. – P. 78 – 85.
37. **Fox J.** Heat Transfer and Air Flow in Transverse rectangular Notch / J. Fox // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1965. – Vol. 8. – P. 269 – 270.
38. **Ghaddar N.K.** Numerical investigation of incompressible flow in grooved channels / N.K. Ghaddar, K.Z. Korczak, B.B. Mikic, A.T. Patera // J. Fluid Mech. – 1986. – V. 163. – P. 99 – 127.
39. **Hering T.** Flow regimes and drag characteristics of yawed elliptical cavities with varying depth / T. Hering, E. Savory // Journal of Fluids Engineering. – 2007. – Vol. 129. – No. 12. – P. 1577 – 1583.
40. **Kistler A.L.** Some properties of turbulent separated flows / A.L. Kistler, F.C. Tan // Phys. Fluids. – 1967. – Vol. 10. – pt. 11. – № 9. – P. 77 – 89.
41. **Kosseff J.R.** On end wall effects in a lid-driven cavity flow / J.R. Kosseff, R.L. Street // J. Fluids Eng. – 1984. – V. 106. – N. 4. – Рус. пер. О влиянии торцевых стенок на течение в каверне с движущейся крышкой // Тр. Амер. о-ва инж.-мех. – Сер. Теор. основы инж. расчетов. – 1984. – Т. 106. – № 4. – С. 130 – 135.
42. **Kosseff J.R.** The lid-driven cavity flows: a synthesis of qualitative and quantitative observations / J.R. Kosseff, R.L. Street // Ibid. – Рус. пер. Течение в каверне с движущейся крышкой // Там же. – С. 136 – 145.
43. **Maull D.J.** Three-dimensional flow in a cavities / D.J. Maull, L.F. East // J. Fluid Mech. – 1963. – Vol. 16. – Pt. 3. – P. 242 – 251.

44. **Mills R.D.** On closed motion of a fluid in a square cavity / R.D. Mills // J. Roy. Aero. Soc. – 1965. – V. 69. – P. 116 – 121.
45. **Oka S.N.** Stacionarno dvodimenziono vrtlozno strnjanje u oblastima za zatvorenim strujnicama / S.N. Oka. – Dokt. Disertacija, Masin. Fak. Unw. u Beogradu. – Beograd. – 1971. – 294 p.
46. **Pan F.** Steady flows in rectangular cavities / F. Pan, A. Acrivos // J. of Fluid Mech. – 1967. – Vol. 28. – Part 4. – P. 643 – 655.
47. **Patel R.P.** Effects of stream turbulence on free shear flows / R.P. Patel // Aeron. Quart. – 1978. – V. 29. – № 1. – P.33 – 43.
48. **Ramaswamy B.** Finite element solution for advection and natural convection flows / B. Ramaswamy // Comput. and Fluids. – 1988. – V. 16. – No. 4. – P. 349 – 388.
49. **Reddy J.N.** Penalty-finite-element analysis of 3-D Navier-Stokes equations / J.N. Reddy // Comp. Meth. in Appl. Mech. and Ing. – 1982. – V. 35. – P. 87 – 106.
50. **Rockwell D.** Self-sustained oscillations of impinging free shear layer /D. Rockwell, E. Naudascher // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1979. – Vol. 11. – P. 67 – 94.
51. **Roshko A.** Some measurements of flow in a rectangular cut out / A. Roshko // NACA TN 3488. – 1956. – 245 p.
52. **Tani I.** Experimental Investigation of Flow Separation associated with a Step or a Groove Aeronautical Research Institute / I. Tani, M. Iuchi, H. Komoda // University of Tokyo. – Report. № 364. – 1961. – 355 p.
53. **Terekhov V.I.** Forced-convection heat transfer from the bottom of trenches with rectangular or inclined walls / V.I. Terekhov, N.I. Yarygina // Experimental Heat Transfer. – 1996. – Vol. 9. – No. 2. – P. 133 – 148.
54. **Terekhov V.I.** Turbulent heat transfer in a crossflow cavity with inclined sidewalls / V.I. Terekhov, N.I. Yarygina, A.Yu. D'yachenko // Proceedings of the Twelfth International Heat Transfer Conference. – Elsevier, 2002. – P. 615 – 619.
55. **Townes H.W.** Experiments on the flow over a rough surface / H.W. Townes, R.H. Sabersky // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1966. – Vol. 9. – № 8. – P. 729 – 738.
56. **Wieghardt K.** Erhöhung des turbulenten Reibungswiderstandes durch Oberflächenstörungen / K. Wieghardt // Forschft, Schiffstech. – 1953. – № 2. – S. 65 – 81.
57. **Yamamoto Hi.** A numerical study of laminar heat transfer at; bottom surface of a cavity submerged in separated flow region of duct /Hi. Yamamoto, N. Seki, S. Fukusako // Heat and Mass Transfer. – 1982. – Vol. 16. – No. 4. – P. 219 – 227.

Надійшла до редколегії 03.02.2013.

УДК 532.516

Д. А. Редчиц*, О. Б. Полевой*, С. В. Моисеенко**

**Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «ТРАНСМАГ»*

***Херсонский национальный технический университет*

УПРАВЛЕНИЕ ВИХРЕВОЙ ДОРОЖКОЙ КАРМАНА С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННЫХ АКТУАТОРОВ

На основі фізичної моделі діелектричного бар'єрного розряду побудована математична модель, що описує нестационарні електро- і аеродинамічні процеси при роботі плазмового актуатора. Показана можливість зменшення коефіцієнта опору циліндра за допомогою плазмового