

УДК 533.601

Е.В. Кравец*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

СРАВНЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОЙ И ТРЕХМЕРНОЙ КАВЕРНАХ БЕЗ ДНА НАД ЭКРАНОМ

Рассмотрены структуры потока в двумерной и трехмерной открытых кавернах без дна над экраном при обтекании вязкой несжимаемой жидкостью. Проведен сравнительный анализ кинематических и динамических характеристик. Показано влияние пространственного фактора на структуру течения в открытой каверне без дна над экраном.

Ключевые слова: вязкая несжимаемая жидкость, численные методы, каверна без дна над экраном, циркуляционное течение, структура образования вихрей, пространственный фактор.

Розглянуто структури течії в двовимірній та тривимірній відкритих кавернах без дна над екраном у випадку обтікання в'язкою нестисливою рідиною. Проведено порівняльний аналіз кінематичних і динамічних характеристик. Показано вплив просторового фактора на структуру течії у відкритій каверні без дна над екраном.

Ключові слова: в'язка нестислива рідина, числові методи, каверна без дна над екраном, циркуляційна течія, структура утворення вихорів, просторовий фактор.

The flow structures in two-dimensional and three-dimensional opened cavities without bottom above a screen with streamline of viscous incompressible flows are considered. The comparative analysis of kinematic and dynamic characteristics is carried out. Influence of space factor into flow structure in opened cavity without bottom above a screen are established.

Key words: viscous incompressible liquid, numerical methods, cavity without bottom above a screen, circulation flow, structure of vortical appearance, space factor.

Введение. В работах [1; 2; 13; 16; 17] для трехмерной каверны и прямоугольной траншеи с циркуляционным движением несжимаемой жидкости было отмечено существенное влияние пространственного фактора на структуру течения. В частности, профили средней скорости, полученные для двумерного случая, значительно отличаются от скоростей, измеренных в плоскости симметрии трехмерной модели [17].

В [16; 17] показано, что «при заданном числе Рейнольдса течение в плоскости симметрии существенно слабее, чем это следует из достаточно точных двумерных численных расчетов [12; 14; 15; 18]», так как пространственный характер течения в задачах при трехмерной постановке обусловлен «замедляющим влиянием торцевых стенок» [2; 13]. Кроме того, наличие торцевых стенок приводит к образованию глобальных и локальных трехмерных вихревых структур [17], что не может быть получено при плоской формулировке.

Постановка задачи. В работе проведено численное исследование течения вязкой несжимаемой жидкости вокруг двух призм, расположенных тандемом по отношению к невозмущенному потоку и находящихся вблизи плоской поверхности (экрана). Промежуток между торцами призм представляет собой открытую каверну без дна над экраном. Задача решалась в двумерной [3; 5; 6; 7; 8] и трехмерной [4; 9; 10; 11] постановках.

Анализ результатов. Гидродинамические характеристики и структура течения. На рис. 1, а показаны изобары для плоской каверны 2D, а на рис. 1, б – для плоскости симметрии трехмерной каверны 3D. Очевидно качественное и

количественное различие представленной сетки изобар. В частности, имеется существенное несовпадение в форме «нулевой» изобары, а также исчезает область повышенного давления в правом нижнем углу каверны (рис. 1, б). В трехмерной каверне не просматривается циркуляционное течение по аналогии с плоской каверной, которое возникает над верхней стенкой второй «призмы» и на плоскости-экране в районе дна каверны.

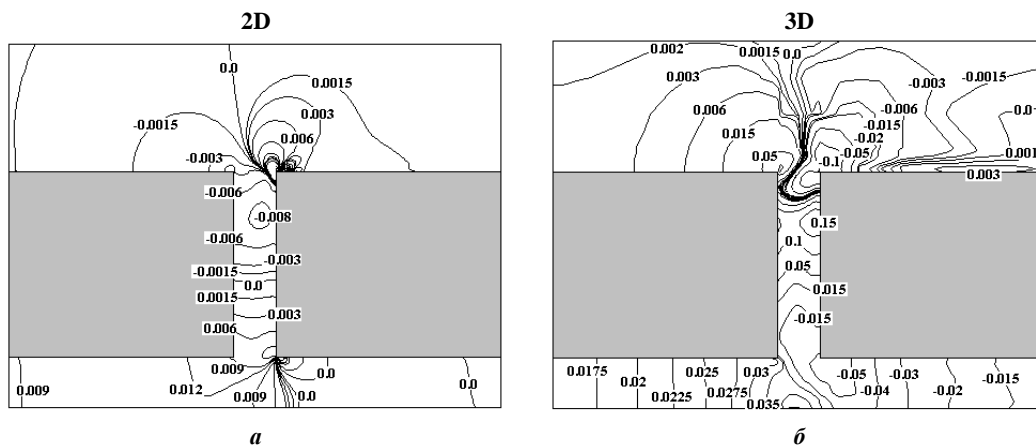


Рис. 1. Изобары в каверне

Как показано в [5–8], при плоском течении в каверне вихрь возникает в результате стекания внешнего потока с верхней стенки передней «призмы» на «торец» второй «призмы» («призма» для двумерного случая при $z \rightarrow \infty$ имеет прямоугольную форму в плоскости xOy). На «торце» возникает точка растекания: один поток движется вдоль «торца» вверх, втекая во внешний поток над каверной, а второй – вниз, образуя и подпитывая циркуляционное течение в каверне. Поскольку каверна не имеет дна, циркуляционное течение в ее нижней части взаимодействует с внешним надэкраным потоком, который, подтормаживая периферийные слои вихря, разворачивает их в направлении надэкранного течения с последующей эжекцией.

Отличительная структура течения в трехмерной каверне, в области между торцами прямоугольных призм, расположенных по схеме «тандем» над экраном, связана с тем, что на потоки, стекающие с верхней и нижней граней передней призмы, воздействуют эквивалентные по интенсивности два симметрично расположенные потока с боковых граней. В результате в трехмерной каверне образуется сложная вихревая система из спиралеобразного нисходящего, вихревого центрального и вихревого периферийного течений, а также локальные зоны с циркуляционным течением на верхней грани задней призмы и на плоскости-экране в районе дна каверны. Такая принципиально отличительная структура течения в плоской и трехмерной кавернах обуславливает существенную разницу в величинах их гидродинамических характеристик.

Влияние пространственного фактора на структуру течения жидкости в каверне также подтверждается графиками изменения коэффициента давления (рис. 2) и касательных напряжений (рис. 3) на торцевых стенках АВ и CD, изолиний продольной (рис. 4), поперечной (рис. 5) компонент скорости и их профилями в центральных сечениях каверны (рис. 6).

Коэффициент давления \bar{p} на стенке CD плоской каверны принимает наибольшие значения вблизи угловых точек D и C (рис. 2, а). Для потока в окрестности угловой точки A, а также около средней части стенки (между точками C и D) характерно разрежение, что выражается в отрицательных величинах коэффициента давления.

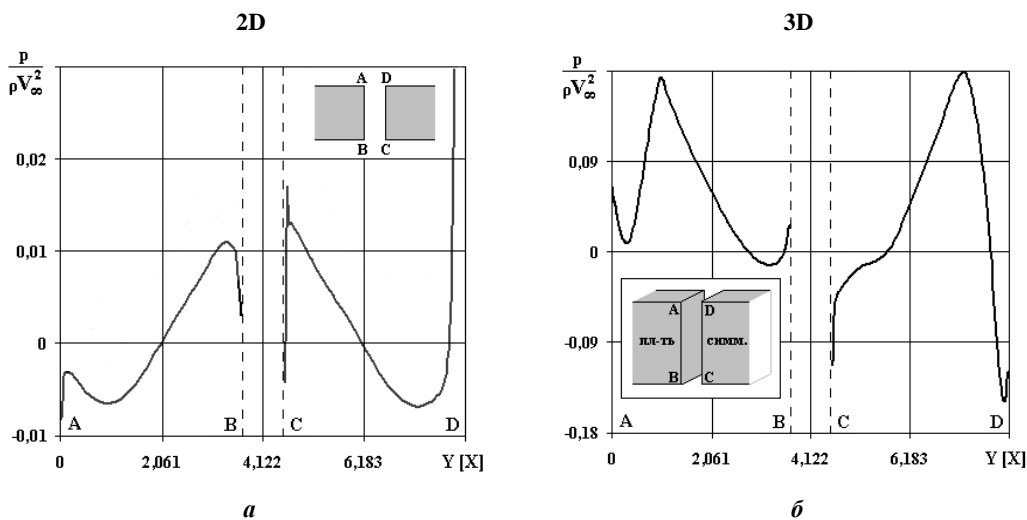


Рис. 2. Распределение давления на вертикальных стенках каверны

Для срединной части торцов в плоскости симметрии трехмерной каверны (рис. 2, б) кривая коэффициента давления характеризуется, в основном, положительными значениями, что указывает на сжатие потока в этих областях, за исключением небольших по протяженности областей в окрестностях точек B, C и D.

Сравнение профилей распределения касательных напряжений τ_w (рис. 3) на стенках двумерной и трехмерной каверн указывает на существенное различие в структуре пристенного течения с присущими ему направлениями, точками торможения и значениями локальных скоростей.

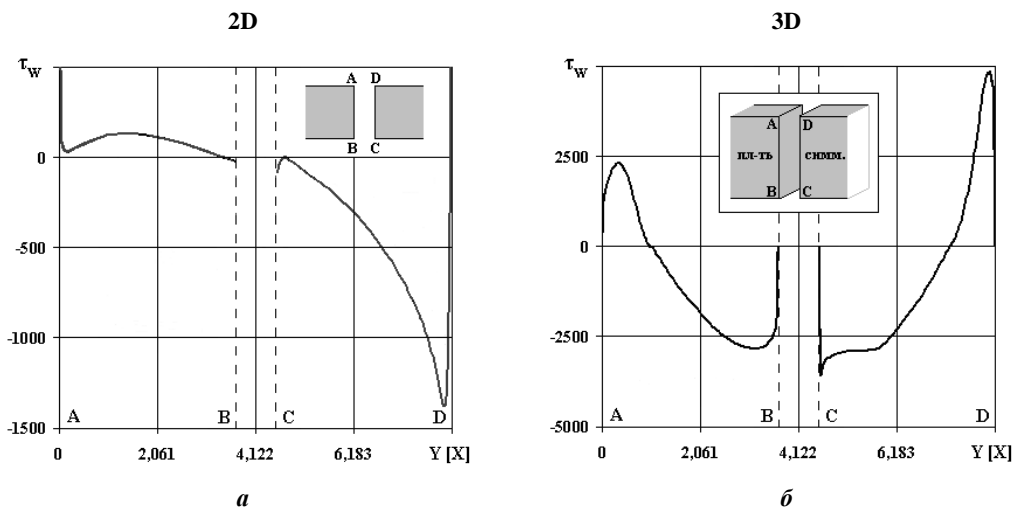


Рис. 3. Распределение касательных напряжений на вертикальных стенках каверны

На рис. 4 и 5 приведены изолинии продольной и поперечной компонент скорости для плоской и трехмерной каверн.

Изолинии (рис. 4, а, 5, а) подтверждают наличие в двумерной каверне основного вихря, вращающегося по часовой стрелке, что согласуется с отрицательными убывающими значениями изолиний поперечной компоненты скорости (рис. 5, а) на наветренном «торце призмы» и положительными возрастающими – на подветренном «торце». Воздушный поток, движущийся параллельно верхней горизонтальной стенке передней призмы, натекает на правый верхний угол «межторцевого» пространства и движется вниз, вдоль правой стенки (отрицательные значения компоненты). Так как в «межторцевом» пространстве существует устойчивый циркуляционный вихрь, то часть воздуха будет перемещаться снизу-вверх вдоль левой стенки (положительные значения поперечной компоненты скорости).

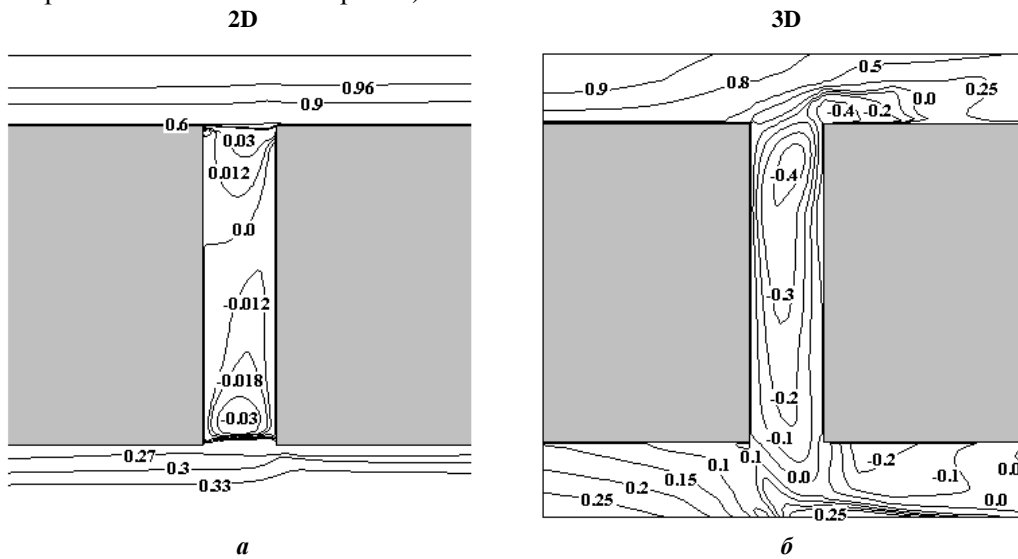


Рис. 4. Изолинии продольной компоненты скорости V_x в каверне

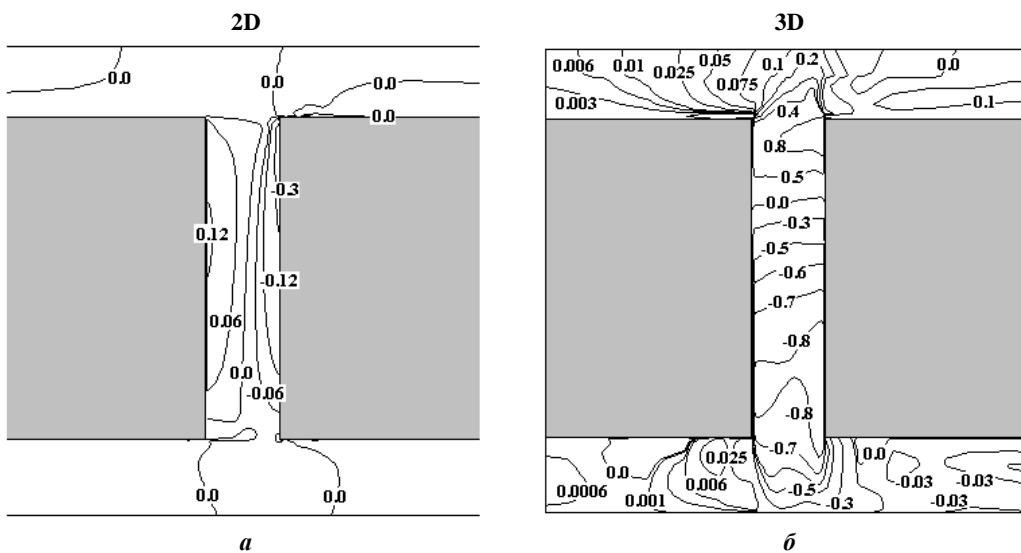


Рис. 5. Изолинии поперечной компоненты скорости V_y в каверне

Приведенные на рис. 6, а профили продольной и поперечной компонент скорости для двумерной каверны качественно совпадают с аналогичными профилями для плоской классической каверны с движущейся крышкой. Это позволяет предположить, что надэкранный поток из-под нижней стенки передней «призмы» не попадает в область каверны, а продолжает движение вдоль «жидкой» границы, отделяющей его от циркуляционного течения в самой каверне.

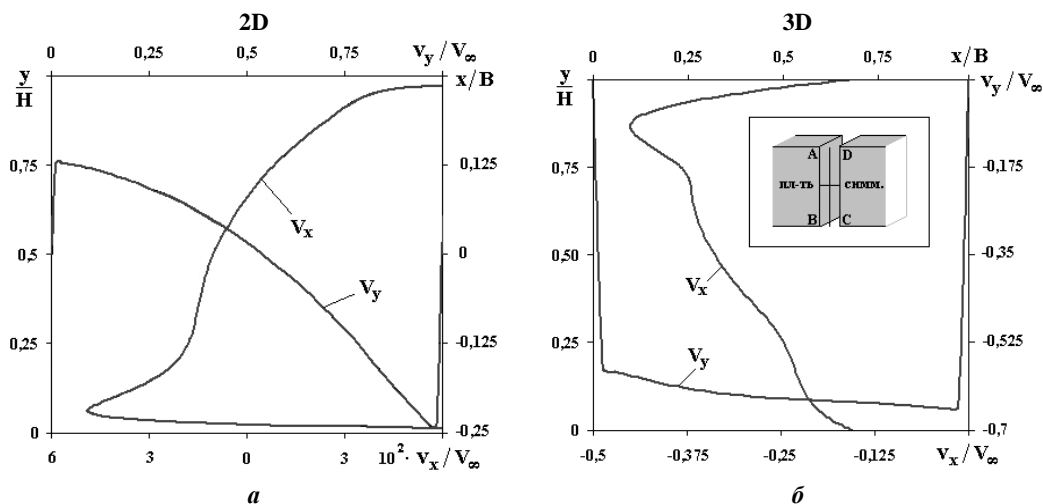


Рис. 6. Профили продольной V_x и поперечной V_y компонент скорости в центральных сечениях каверны

Таким образом, анализ течения для двумерной постановки задачи показывает, что внешний поток с верхней стенки передней «призмы» натекает на заднюю «призму» и вдоль ее «торца» попадает в нижнее надэкранный пространство. Течение из верхней части каверны в ее нижнюю часть образует границу, которая совместно с «торцом» передней «призмы» изолирует циркуляционное течение в каверне от внешнего потока. В связи с этим движения жидкости из надэкранный пространства вдоль «торца» передней «призмы» на верхнюю стенку задней «призмы» не возникает. При этом массообмен циркуляционного течения поддерживается внешним потоком над верхними стенками «призм». Трехмерное течение в рассмотренной конфигурации каверны отличается более сложной многовихревой структурой, которая обуславливает иную качественную и количественную реализацию гидродинамических характеристик в плоскости симметрии трехмерной каверны. Исходя из аналогии с задачей о внешнем обтекании крыла конечного размаха, можно предположить, что, начиная с некоторого $z = Const$ трехмерной каверны, структура течения в плоскости ее симметрии, а следовательно, и локальные гидродинамические характеристики могут оказаться такими же, как у плоской каверны при равной скорости обтекающего их дозвукового потока.

Выводы. Таким образом, анализ и сравнение структур потока, а также распределения кинематических и динамических параметров в открытой каверне без дна над экраном при решении задачи в плоской и пространственной формулировках позволяют утверждать, что установленная картина течения в межторцевой области двух призм над экраном принципиально отличается от аналогичной плоской задачи.

А это означает, что корректное моделирование реальных прикладных задач данного класса возможно лишь в трехмерной постановке.

Библиографические ссылки

1. **Белоліпецький В.М.** Численне дослідження рециркуляційних течій в трьохмерній каверні/В.М. Белоліпецький, В.Ю. Костюк//ПМТФ. – 1990. – № 1. – С. 100 –104.
2. **Богатырев В. Я.** О торцевых эффектах в траншеях прямоугольного поперечного сечения / В. Я. Богатырев, А. В. Горин // Градиентные и отрывные течения: сб. науч. тр. – Новосибирск. – 1976. – С. 132 – 139.
3. **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.
4. **Кочубей А. А.** Анализ экспериментальных и численных исследований вихревых течений в трехмерных кавернах / А. А. Кочубей, Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Механіка. – 2013. – Вип. 17. – Т. 1. – № 6. – С. 51 – 63.
5. **Кравец В. В.** Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. транспорту ім. академ. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 8. – С. 61 – 69.
6. **Кравец Е. В.** Сравнительный анализ течения в открытом и частично перекрытом межвагонном пространстве при движении скоростного поезда / Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Механіка. – 2004. – Вип. 8. – Т. 1. – № 6. – С. 26 – 33.
7. **Кравец Е. В.** Математическое моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой среды в межвагонном пространстве с крышным обтекателем / Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Механіка. – 2005. – Вип. 10. – Т. 1. – № 10/1. – С. 66 – 73.
8. **Кравец Е. В.** Влияние типа обтекателя на аэродинамическое сопротивление межвагонного пространства скоростного поезда / Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Механіка. – 2006. – Вип. 10. – Т. 1. – № 2/1. – С. 113 – 119.
9. **Кравец Е. В.** Численное моделирование пространственного течения воздуха в межвагонном промежутке при скоростном движении поезда / Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Механіка. – 2008. – Вип. 11. – Т. 1. – № 5. – С. 49 – 60.
10. **Кравец Е. В.** Структура вихреобразования при обтекании вязким несжимаемым потоком прямоугольных призм, расположенных тандемом над экраном с открытым межторцевым пространством / Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Механіка. – 2011. – Вип. 15. – Т. 1. – № 5. – Т. 19. – С. 43 – 53.
11. **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 // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Механіка. – 2012. – Вип. 16. – Т. 1. – № 5. – Т. 20 – С. 43 – 50.
12. **Agarwal R. K.** A Third-Order-Accurate Upwind Scheme for Navier-Stokes Solutions at High Reynolds Numbers / R.K. Agarwal // AIAA 19th Aerospace Sciences Meeting. – St. Louis. – 1981. – Jan., 12-15. – P. 31 – 33.
13. **Bogatyrev V. Ya.** End Effects in Rectangular Cavities / V. Ya Bogatyrev, A. V. Gorin // Fluid Mechanics – Soviet Research. – 1978, July-Aug. – Vol. 7. – No. 4. – P. 101 – 106.
14. **Ghia U.** Solution of Incompressible Navier-Stokes Equations by Coupled Strongly Implicit Multi-Grid Method / U. Ghia, K.N. Ghia, C.T. Shin // J. Comp. Phys. – 1982. – Vol. 48. – P. 387 – 411.
15. **Gresho P. M.** A Modified Finite Element Method for Solving the Time-Dependent, Incompressible Navier-Stokes Equations / P.M. Gresho, S.T. Chan, C.D. Upson, R.L. Lee // J. for Numerical Methods in Fluids. – 1983. – Vol. 8. – P. 53 – 57.
16. **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. Америк. о-ва инж.-мех. – Сер. Теор. основы инж. расчетов. – 1984. – Т. 106. – № 4. – С. 130 – 135.

17. **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 // *Тр. Амер. о-ва инж.-мех.* – Сер. Теор. основы инж. расчетов. – 1984. – Т. 106. – № 4. – С. 136 – 145.

18. **Schreiber R.** Driven Cavity Flows by Efficient Numerical Techniques / R. Schreiber, H.V. Keller // *J. Comp. Phys.* – 1983. – Vol. 49. – P. 310 – 333.

Надійшла до редколегії 12.01.2014

УДК 532.685:536.24

А. П. Лукиша

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИСПАРЕНИИ ПОТОКА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПОРИСТОМ КАНАЛЕ

В одномерной постановке получено аналитическое решение уравнения теплопроводности при движении двухфазного испаряющегося теплоносителя сквозь пористый цилиндрический канал при граничных условиях первого, второго и третьего рода. Полученное решение сравнено с имеющимся решением для плоского канала. Выведено соотношение для расчёта паросодержания применительно к рассматриваемой задаче.

Ключевые слова: пористый цилиндрический канал, двухфазный испаряющийся поток, уравнение теплопроводности, граничные условия 1, 2, 3-го рода.

В одновимірній постановці отримано аналітичний розв'язок рівняння теплопровідності під час руху двофазного теплоносія, що випаровується крізь пористий циліндричний канал за межових умов першого, другого і третього роду. Отриманий розв'язок зіставлено з відомим розв'язком для плоского каналу. Виведено співвідношення для розрахунку паровмісту стосовно аналізованої задачі.

Ключові слова: пористий циліндричний канал, двофазний потік, що випаровується, рівняння теплопровідності, межові умови 1, 2, 3-го роду.

In this article an analytical solution of the heat equation in one-dimensional formulation at the motion of two-phase evaporating coolant through the porous cylindrical channel at the boundary conditions of the first, second and third kind is derived. The resulting solution is compared with the existing solution for the flat channel. Produced the equation for calculating steam content in regard to the problem.

Key words: porous cylindrical channel, two-phase evaporating flow, heat conduction equation, the boundary conditions of the first, second and the third kind.

Введение. Важной задачей развития техники и промышленности на современном этапе является внедрение высокоэффективных энергетических машин и агрегатов. Одним из путей решения данной задачи является создание высокоэффективных теплообменников в составе энергетических машин. Примером такого рода теплообменников могут служить пористые высокотеплопроводные элементы, через которые прокачивается охладитель в различных фазовых состояниях.

В целом ряде работ [2 – 6] рассмотрен вопрос теплогидравлической эффективности пористых теплообменных каналов при жидкостном движении теплоносителя. Однако наибольший интерес представляет случай движения сквозь пористый теплообменный элемент охладителя с фазовым переходом испарения.