

СОПРЯЖЁННЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПРИ ДВИЖЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПОЛОСТИ С УЧЁТОМ ЕЁ ОХЛАЖДЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВНЕШНЮЮ ГРАНИЦУ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Крайнов А.В., к.ф.-м.н.

Томский политехнический университет, г.Томск

E-mail: lux_veritatis@mail.ru

Важное прикладное значение имеют процессы переноса тепла с учетом движения среды. Это обусловлено тем, что такие процессы реализуются в теплотехнических устройствах, энергетических системах и технологических процессах различных производственных циклов. Необходимость изучения режимов движения конвективных течений и сложных условий теплообмена связано с развитием энергоемких отраслей промышленности [1-6].

В данной работе рассматривается нестационарное взаимодействие жидкости с открытой полостью. Изучается процесс движения расплава металла в выемке с учётом теплообмена с её стенками. Теплофизические характеристики расплава и стенок полости идентичны. Цель данной работы – исследовать гидродинамику и сопряжённый теплообмен при движении вязкой несжимаемой жидкости в прямоугольной полости в условиях охлаждения внешней границы боковой стенки.

Изучение описанного процесса проводилось с использованием математической модели на основе системы уравнений Навье-Стокса в переменных вихрь-функция тока, уравнения энергии, уравнения теплопроводности для материала полости с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \omega}{\partial X} + V \frac{\partial \omega}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial Y^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} = \omega; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \theta_1}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial Y^2} = \frac{\partial \theta_1}{\partial \text{Fo}}. \quad (4)$$

На нижней границе ($y = S$, $D < x < L$) и боковой ($x = D$, $S < y < H$) выставляется условие непротекания, прилипания, а также граничное

условие четвёртого рода для уравнения энергии (задача решена в сопряжённой постановке).

Условия неразрывности тепловых потоков и непротекания заданы на линии симметрии ($x=L, S < y < H$). На участке выхода выставались условия «сноса» и «мягкое» граничное условие для скорости и температуры соответственно [4].

На внешних границах полости заданы условия теплоизоляции, за исключением боковой области ($x=0, 0 < y < H$), на которой задано граничное условие третьего рода (моделируется интенсивный теплообмен с внешней средой):

$$\frac{\alpha \delta_x}{\lambda} \Delta \theta = -\frac{\partial \theta_1}{\partial X}.$$

Здесь Fo – число Фурье; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; θ – безразмерная температура жидкости; θ_1 – безразмерная температура материала полости; X, Y – безразмерные декартовы координаты; U, V – безразмерные продольная и поперечная составляющая скорости движения жидкости соответственно; ω, ψ – переменные вихрь - функция тока; x, y – размерные декартовы координаты; L, H – линейный размер полости по координате x и y соответственно; D, S – линейный размер стенки полости по координате x и y соответственно; $\Delta \theta$ – разность безразмерных температур между внешней боковой поверхностью и окружающей средой; α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности; δ_x – толщина стенки по координате x .

Решена система уравнений Навье-Стокса в переменных функция тока-вихрь, уравнение энергии и уравнение теплопроводности методом конечных разностей [4]. Разностные аналоги уравнений переноса и теплопроводности решены методом прогонки [4]. Уравнение Пуассона на каждом временном слое решалось методом последовательной верхней релаксации. Использовалась разностная схема второго порядка точности.

Вычисления выполнялись на равномерной и неравномерной разностных сетках. Оценка достоверности результатов численного моделирования проводилась проверкой консервативности использовавшейся разностной схемы аналогичным методом, применявшимся в [5, 6].

Рассматривалась жидкость разных типов (расплавленный свинец, жидкая сталь, расплав легких металлов, мазут и т.д.). На рис.1 - 3 приведены типичные результаты численных исследований описанных процессов для жидкой стали.

Анализ гидродинамики течения позволяет выделить характерные области прямого (1 этап) и возвратного (2 этап) движения жидкости (рис.1).

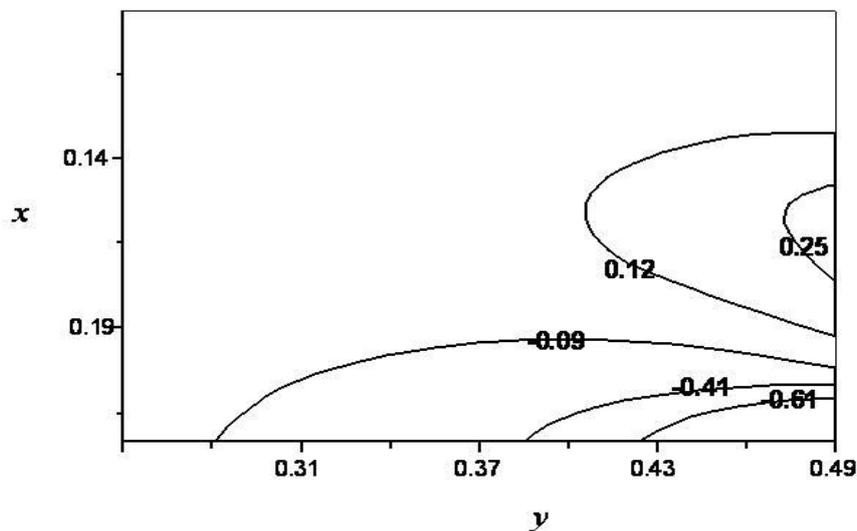


Рис.1 Изолинии поперечной составляющей скорости в момент времени $Fo=4,5 \cdot 10^{-2}$ при числе $Re=300$ и геометрическом отношении сторон полости $L/H=1/2$

С увеличением скорости затекания жидкости профиль поперечной составляющей скорости в начальных сечениях полости становится более заполненным и близким к постоянному значению (темп заполнения уменьшается на 15 % по сравнению с условиями теплоотвода через внешнюю донную поверхность).

При движении жидкости к основанию выемки поперечная составляющая скорости падает в условиях роста продольной составляющей (рис.2).

На рис.3 представлены распределения температуры в твёрдой и жидкой фазах в различных сечениях y по координате x в момент времени $Fo=4,5 \cdot 10^{-2}$ при $Re=400$, $Pr=0.979$ и геометрическом отношении сторон полости $L/H=1/2$: 1 - $y=0.51$; 2 - $y=0.6$; 3 - $y=0.73$. Характер распределения температуры в жидкой фазе по сечениям носит более выраженный характер, чем в твёрдой. В твердой фазе температурный напор уменьшается по высоте полости, что обусловлено теплоотводом с её внешней боковой поверхности и конвективным теплопереносом в гидродинамической области.

Результаты численного анализа позволяют оценить влияние охлаждения внешней поверхности боковой стенки полости на условия теплообмена и гидродинамическую картину течения теплоносителя.

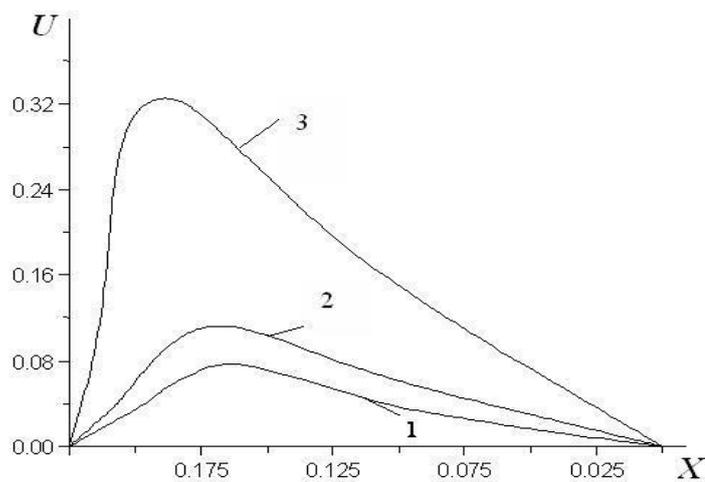


Рис.2 Изолинии продольной составляющей скорости в момент времени $Fo=4,5 \cdot 10^{-2}$ при числе $Re=300$ и геометрическом отношении сторон полости $L/H=1/2$. Кривые соответствуют значениям $U(X)$ в сечениях: 1 - $y=0.815$; 2 - $y=0.733$; 3 - $y=0.625$

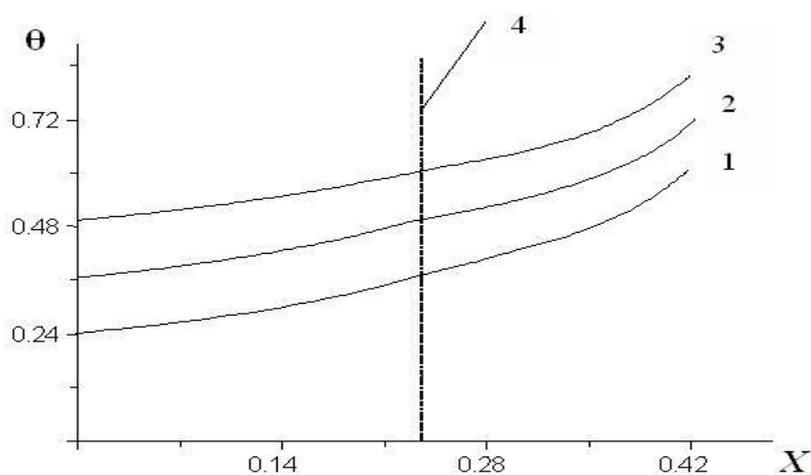


Рис.3 Распределения температуры в твёрдой и жидкой фазах в различных сечениях y по координате x в момент времени $Fo=4,5 \cdot 10^{-2}$ при $Re=400$, $Pr=0.979$ и геометрическом отношении сторон полости $L/H=1/2$: 1 - $y=0.51$; 2 - $y=0.6$; 3 - $y=0.73$; 4 - граница раздела жидкой и твёрдой фаз

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о возможности расширения области применения математического аппарата [3, 6] для решения задач сопряжённого теплообмена при движении жидкости в полостях с более сложными геометриями и условиями теплопереноса.

Список литературы:

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Анищенко Л.М. Высокотемпературные технологические процессы. Теплофизические основы. - М.: Наука, 1985. – 172 с.
2. Fedorov A.G., Viskanta R. Three-dimensional conjugate heat transfer in the micro-channel heat sink for electronic packaging // J.Heat Mass Transfer.-2000.-№43.-p.399-415.
3. Krainov A. V., Kuznetsov G. V. Conjugate heat transfer during viscous liquid movement in the open cavity, considering its cooling through outer boundary of back surface (01023) // EPJ Web of Conferences. - 2014 - Vol. 76. - p. 1-6
4. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 784 с.
5. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Modelling of non-stationary heat transfer in closed area with a local heat source // J. Thermophysics and Aeromechanics.-2005.-v.12.-№2.-p.287-295.
6. Kuznetsov G.V., Krainov A.V. Conjugate heat exchange and hydrodynamics for a viscous incompressible fluid moving in a rectangular cavity // J. Applied Mechanics and Technical Physics.- 2001.- v.42.- №5.- p.851-856.

УДК 536.2:532/533; 532.516

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТЕКАНИЯ ВЯЗКОЙ КАПЛИ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА С ПОДЛОЖКОЙ ПРОСТОЙ ГЕОМЕТРИИ

Крайнов А.В., к.ф.-м.н., Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н.
Томский политехнический университет, г.Томск
E-mail: lux_veritatis@mail.ru

Ручейковые течения жидкости и капли широко распространены в природе, используются в технике и перспективны в условиях разработки новых высокоинтенсивных теплообменных систем. Кроме ручейкового течения на поверхности теплообмена возможна реализация режима капельной конденсации [1].

Многие процессы в каплях близки к пленочным процессам и процессам в горизонтальных слоях жидкости [2]. Эффективность использования тонких пленок определяется малым удельным расходом жидкости и интенсивным теплообменом. Многие процессы могут быть оптимизированы за счет утоньшения пленки [3]. Возможны разрывы пленок, явления осушения поверхностей [4].

В работе [5] описаны регулярные структуры, которые также можно рассматривать как семейство стекающих ручейков, сопряженных по контактными линиями. Наличие протяженной тонкой пленки способствует интенсификации теплообмена.