

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 линиям. Наличие протяженной тонкой пленки способствует интенсификации теплообмена.

Актуальность рассмотрения теплообмена в капле жидкости и её испарения также определяется необходимостью усовершенствования технологии спреинового охлаждения поверхностей [6].

Целью данной работы является изучение теплопереноса при растекании капли вязкой жидкости на нагретой подложке простой геометрии.

Рассматривается капля жидкости постоянного объёма, лежащая на горизонтальной поверхности в поле силы тяжести, направленном перпендикулярно подложке простой геометрии (рис.1). Возможные эффекты, обусловленные химическими и физическими процессами вблизи движущейся линии контакта и явление гистерезиса краевого угла, не рассматриваются. Предполагается, что угол контакта постоянный. Кроме того, капля окружена неподвижным газом, форма которой определяется балансом капиллярных и гравитационных сил, а поверхность её считается недеформируемой. На рис.1 определена область $\Omega := \{0 \leq r_1 < R, 0 \leq Z \leq B(r_1)\}$, где R – радиус смоченного пятна, $Z = B(r_1)$ – функция, описывающая поверхность капли (все приведённые величины на рис.1 являются размерными).

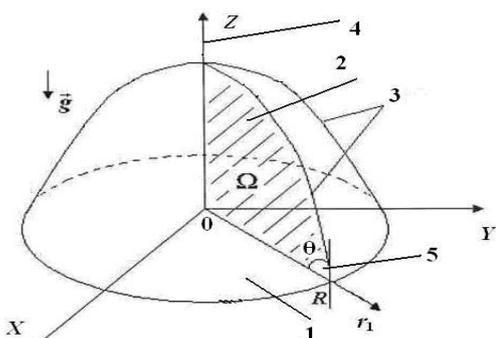


Рис.1 Геометрия расчётной области (1-5):
1 - подложка; 2 - внутренняя область капли (гидродинамическая); 3 – поверхность капли (линия контакта); 4 – ось симметрии капли;
5 – угол смачивания

Декартова система координат (плоскость XY) соответствует подложке, ось симметрии капли совпадает с осью OZ , вектор силы тяжести направлен против оси Z . Для изучения процессов растекания капли [7] или осаждение её на подложку [8] используются уравнения движения, энергии в цилиндрической системе координат (ЦСК).

Запишем математическую постановку задачи в ЦСК в безразмерном виде с дифференциальными уравнениями (о которых говорилось выше) [9, 10] с соответствующими краевыми условиями

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial \omega}{\partial r} + v_z \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{\omega u_r}{r} = \text{Pr} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} - \frac{\omega}{r^2} \right) - \text{Ra Pr} \frac{\partial \theta_1}{\partial r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = \omega r \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial \theta_1}{\partial r} + v_z \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z^2} \quad (3)$$

Численное решение задачи (1)-(3) проведено в области Ω (рис.1), ограниченной подложкой простой геометрии, поверхностью капли и её осью симметрии. Здесь Ra – число Рэлея; Pr – число Прандтля; θ_1 – безразмерная температура жидкой капли; r, z – безразмерные цилиндрические координаты; u_r, v_z – безразмерные скорости движения жидкости вдоль соответствующих координат r и z соответственно; ω, ψ – переменные вихрь - функция тока; τ – безразмерное время.

Граничное условие на подложке при $z=0$ представляет собой условие прилипания, непротекания и задаётся граничное условие второго рода. На оси симметрии капли задаются условия непротекания и неразрывности тепловых потоков.

Граничные условия на поверхности капли могут быть записаны в виде [13]

$$\omega = -Ma \frac{1}{\sqrt{1+B_r^2}} \left(\frac{\partial \theta_1}{\partial r} + B_r' \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \right), \quad \psi = 0;$$

$$-\frac{B_r'}{\sqrt{1+B_r^2}} \frac{\partial \theta_1}{\partial r} + \frac{1}{\sqrt{1+B_r^2}} \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = BiT.$$

Из кинематических условий $p_0 - p + 2Ca\bar{n} \cdot D \cdot \bar{n} = -2K$ в предположении, что $Ca \ll 1$, то получаем $p - p_0 = 2K$. Давление в жидкости предполагается равным $p = p_b - \text{Vo} \cdot z$. Учитывая среднюю кривизну поверхности, получим расчётное уравнение для определения профиля капли с соответствующими граничными условиями (условие симметрии, условие задания фиксированного угла смачивания и условие контактной линии):

$$\left(\frac{rB'}{\sqrt{1+B'^2}} \right)' - \text{Vor}B + Cr = 0, \quad (4)$$

$$B'(0) = 0, \quad B'(R_1) = -\text{tg}\theta, \quad B(R_1) = 0. \quad (5)$$

Жидкость и материал подложки выбраны так, чтобы для них $\text{tg}^2\theta \ll 1$ (вода и нержавеющая сталь). Тогда можно предполагать, что $B'^2 \ll 1$ для любого текущего значения радиуса r и уравнение (4) можно упростить

$$(rB')' - \text{Vor}B + Cr = 0. \quad (6)$$

Предполагая, что объем капли постоянен и интегрируя уравнение (6) в пределах от 0 до R_1 получаем значение константы C

$$C = \frac{2\pi R_1 \operatorname{tg}\theta + \operatorname{Bo}}{\pi R_1^2}.$$

Тогда полученная функция

$$B(r) = \frac{2\pi R_1 \operatorname{tg}\theta + \operatorname{Bo}}{\pi \operatorname{Bo} R_1^2} + \frac{\operatorname{tg}\theta}{i\sqrt{\operatorname{Bo}} J_1(i R_1 \sqrt{\operatorname{Bo}})} J_0(ir\sqrt{\operatorname{Bo}}) \quad (7)$$

удовлетворяет уравнению (6) и первым двум условиям (5). Здесь J_0 , J_1 функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно; r - безразмерное значение текущего радиуса капли; R_1 - безразмерное значение радиуса капли ($0 \leq r < R_1$). Из уравнения (7) с учётом третьего условия (5) получим выражение вида

$$\frac{2\pi R_1 \operatorname{tg}\theta + \operatorname{Bo}}{\pi \operatorname{Bo} R_1^2} + \frac{\operatorname{tg}\theta}{i\sqrt{\operatorname{Bo}} J_1(i R_1 \sqrt{\operatorname{Bo}})} J_0(i R_1 \sqrt{\operatorname{Bo}}) = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) (при фиксированном краевом угле и в пределе $\operatorname{Bo} \rightarrow 0$) используется для определения функции $R_1(\operatorname{Bo})$.

В граничных условиях приняты следующие обозначения: K - средняя кривизна поверхности (определяемая величина); p_b - безразмерное давление на границе жидкость - твёрдое тело; Ca - капиллярное число; Ma - число Марангони; Bo - число Бонда.

Система уравнений Навье - Стокса в переменных функция тока -

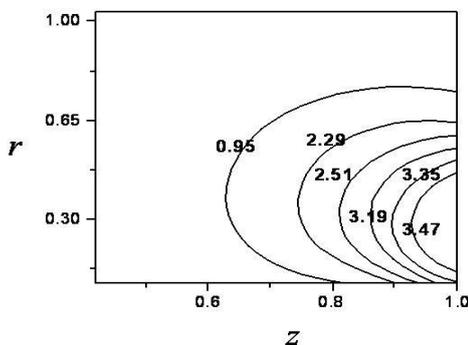


Рис.2 Распределения функции тока при $\operatorname{Ma}=277$, $\operatorname{Ra}=7.1$, $\operatorname{Pr}=13.7$, $\operatorname{Bi}=0.55$

вихрь, уравнение энергии решены методом конечных разностей [9]. Разностные аналоги уравнений переноса и теплопроводности решены методом прогонки [10]. Уравнение Пуассона на каждом временном слое решалось методом последовательной верхней релаксации. Использовалась разностная схема второго порядка точности.

Вычисления выполнялись на равномерных разностных сетках. Оценка достоверности результатов исследования проводилась проверкой консервативности использовавшейся разностной схемы аналогичным методом, применявшимся в [11, 12].

Профиль капли и радиус смоченного пятна рассчитывались численно, исходя из уравнения (4) и граничных условий (5). Численные расчеты проводились в широком диапазоне значений чисел Бонда и краевого угла смачивания. Вычисления проводились для капли воды

объема $V = 0.11$ мл, характерного размера $R = 0.69 \cdot 10^{-2}$ м. Начальная температура подложки $T_w = 20$ °С.

На рис.2 представлено распределение функции тока при числах $Ma=277$, $Ra=7.1$, $Pr=13.7$, $Bi=0.55$. Максимум функции тока соответствует зоне $0.27 < r < 0.39$, $0.85 < z < 0.96$, в которой наблюдается наиболее интенсивное формирование вихревых структур.

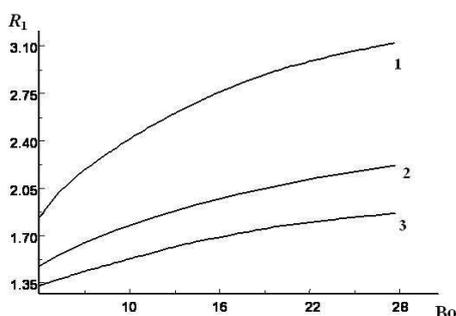


Рис.3 Зависимость радиуса смоченного пятна R_1 от числа Бонда (Bo) при разных краевых углах: 1) $\theta = 4^\circ$; 2) $\theta = 11^\circ$; 3) $\theta = 18^\circ$

мость радиуса смоченного пятна от числа Бонда при разных краевых

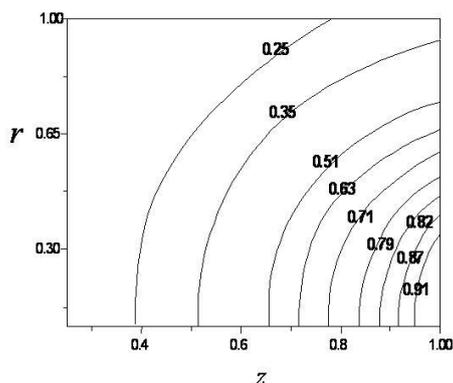


Рис.4 Распределения температуры вдоль координаты r для различных значений z при $Ma=277$, $Ra=7.1$, $Pr=13.7$, $Bi=0.55$

стом угла θ .

На рис.4 приведены распределения температуры вдоль координаты r для различных значений z при $Ma=277$, $Ra=7.1$, $Pr=13.7$, $Bi=0.55$. В условиях рассматриваемых режимов для профиля капли развивается одновихревая конвективная структура, формируемая термокапиллярными силами. Характер поведения температурных распределений в раз-

Результаты расчёта позволяют выявить влияние геометрических характеристик, условий теплообмена на поверхности капли и капиллярно-гравитационной конвекции на формирование поля функции тока. Характер распределения изолиний функции тока качественно сохраняется в приведенном диапазоне чисел подобия.

На рис.3 показана зависимость радиуса смоченного пятна от числа Бонда при разных краевых углах: 1) $\theta = 4^\circ$; 2) $\theta = 11^\circ$; 3) $\theta = 18^\circ$. Результаты получены с использованием нелинейного уравнения (4) с условиями (5). Расчеты показывают, что радиус смоченного пятна растет с ростом числа Бонда. Радиус основания капли увеличивается с ростом гравитации линейно при малых значениях числа Бонда. Нелинейный характер изменения функции наблюдается при больших числах Бонда. Интервал линейности возрастает с ро-

личных сечениях капли качественно сохраняется с изменением угла смачивания.

Кроме того, как показывает анализ, наличие конвективного течения искажает температурное поле по сравнению с режимом теплопроводности (отсутствие движения жидкости).

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о возможности расширения области применения математического аппарата [5-8] для решения сопряжённых задач о растекании капли под действием гравитационных сил на подложках более сложной геометрии в условиях интенсификации теплообменных процессов и фазовых превращений.

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» (шифр федеральной целевой научно-технической программы 2.1410.2014).

Список литературы:

1. Ajaev V.S. Spreading of Thin Volatile Liquid Droplets On Uniformly Heated Surfaces // J. Fluid Mechanics.-2005.- v.528.- p. 279-296.
2. Marchuk I. V. Thermocapillary Deformation of a Thin Locally Heated Horizontal Liquid Layer // J. Engineering Thermophysics.-2009.- v.18.- №3.- p.227-237.
3. Kabov O.A., Zaitsev D.V. Effect of Shear Stress and Gravity On Rupture of a Locally Heated Liquid Film // J. Multiphase Science and Technology.-2009.- v. 21.- № 3. - p.249-266.
4. Silvi N., Dussan V. On the Rewetting of an Inclined Solid Surface by a Liquid // J. Physics Fluids. - 1985.-v. 28.- № 1.- p.5-7.
5. Кабов О.А. Формирование регулярных структур в стекающей пленке жидкости при локальном нагреве // Теплофизика и аэромеханика.- 1998. - т.5. - № 4.- с.597- 602.
6. Horacek B., Kiger K., Kim J. Single Nozzle Spray Cooling Heat Transfer Mechanisms // J. Heat and Mass Transfer. - 2005.- v.48.- № 8.- p. 1425- 1438.
7. Shikhmurzaev Y.D. Spreading of Drops On Solid Surfaces in a Quasi-Static Regime // J. Physics Fluids.- 1997.-v.9.- № 2.- p. 266-275.
8. Гайнова И. А., Сагайдак Е. И., Попов В. Н. Моделирование осаждения капли на металлическую подложку // Сиб. журн. индустр. матем.- 2004.- т.7.- № 4.- с.36-47.
9. Полежаев В.И., Бунэ А.В., Везуб Н.А. и др. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса.- М.: Наука, 1987. - 272 с.
10. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 784 с.
11. 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.
12. Krainov A.V. Conjugate Heat Exchange For a Viscous Incompressible Fluid Moving in a Rectangular Cavity Under Conditions Non-Uniformity Phase Characteristics // Proceedings of International Conference Conjugate problems of mechanics, computer science and ecology.-2004.- p.302-303.

13. Андреев В.К., Еапоненко Ю.А., Еончарова О.Н., Пухначев В.В. Современные математические модели конвекции. - М.: Физматлит, 2008. - 368 с.

УДК 621.1.016 : 621.18

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СЖИГАНИИ ШИВЭ-ОВООСКОГО УГЛЯ МОНГОЛИИ В ВИХРЕВОЙ ТОПКЕ

Красинский Д.В., к.т.н., Саломатов В.В., д.т.н.
Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: dkr@itp.nsc.ru

В работе представлены результаты численного 3D моделирования аэродинамики и топочных процессов при факельном сжигании Шивэ-Овооского бурого угля Монголии в перспективном паровом котле с вихревой топкой. При этом рассматриваются основные конструктивные и режимные параметры проектируемого энергоблока мощностью 800 МВт, включающего такой пылеугольный котел паропроизводительностью 2650 т/ч с вихревой топкой (см. рис. 1) с жидким шлакоудалением. Преимуществами применения котла с вихревой топкой (далее – ВТ), особенности внутренней аэродинамики которой исследовались ранее в работах авторов [1–2], являются: высокая эффективность сжигания широкого спектра топлив при пониженной эмиссии вредных выбросов, благодаря наличию устойчивой структуры вихрей и высокому уровню турбулентности в вихревой камере горения; рациональные массогабаритные характеристики топки. Основными элементами конструкции ВТ являются: футерованная вихревая камера горения с тангенциальным подводом струи аэросмеси, создающей вихревой факел с горизонтально расположенной осью вращения; диффузор и камера охлаждения, заканчивающаяся выпускным газоходом (рис. 1). Конструктивно котлоагрегат с ВТ выполнен как самоопорный, секционированный с помощью горизонтальных цельносварных панелей, с сомкнутыми газоходами, с ширмо-конвективными поверхностями нагрева. Проектируемый энергоблок 800 МВт с вихревой топкой состоит из 16 секций (шириной 4 м каждая) по 2 горелки, разделенных двухсветными экранами. Его основные конструктивные параметры имеют значения: высота – 30.6 м, ширина по фронту – 64 м, по глубине – 24.6 м, число горелок – 32 шт., число двухсветных экранов

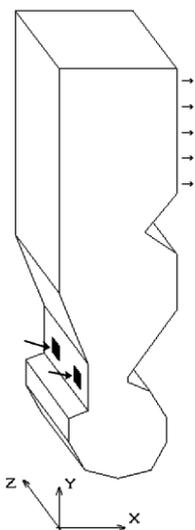


Рис.1. Схема вихревой топки

вращения; диффузор и камера охлаждения, заканчивающаяся выпускным газоходом (рис. 1). Конструктивно котлоагрегат с ВТ выполнен как самоопорный, секционированный с помощью горизонтальных цельносварных панелей, с сомкнутыми газоходами, с ширмо-конвективными поверхностями нагрева. Проектируемый энергоблок 800 МВт с вихревой топкой состоит из 16 секций (шириной 4 м каждая) по 2 горелки, разделенных двухсветными экранами. Его основные конструктивные параметры имеют значения: высота – 30.6 м, ширина по фронту – 64 м, по глубине – 24.6 м, число горелок – 32 шт., число двухсветных экранов