

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Официальный сайт Министерства энергетики РФ. 2013. URL: <http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy/> (дата обращения: 22.01.2013).
2. Половников В.Ю., Хабибулин А.М. Численное моделирование теплопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криожидкостей с учетом промерзания тепловой изоляции // Известия Томского политехнического университета. — 2012. — Т. 320. — № 4. — С. 33–36.
3. Каганер М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. — М.: Машиностроение, 1966. — 275 с.
4. Петров-Денисов В.Г., Масленников Л.А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 193 с.
5. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 28 с.
6. Архаров А.М. Криогенные системы: основы проектирования аппаратов, установок и систем. — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.
7. Стрижак П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — № 8. — С. 26–31.
8. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное решение задачи воспламенения жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» частицей // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45. — № 5. — С. 42–50.
9. Курьев Е.С., Оносовский В.В., Румянцев Ю.Д. Холодильные установки. — СПб.: Политехника, 2004. — 576 с.
10. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства. — СПб.: СПбГАХПТ, 1998. — 146 с.
11. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. — М.: Стройиздат, 1973. — 287 с.
12. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен. — М.: Изд-во МЭИ, 2005. — 549 с.
13. Самарский А.А., Гулин А.Н. Численные методы математической физики. — М.: Научный мир, 2000. — 316 с.
14. Яковлев Е.И. Тепловые режимы хранилищ сжиженных газов. — СПб.: Недра, 1992. — 182 с.

Поступила 24.01.2013 г.

УДК 536.2:532/533; 532.516

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛОСТИ ОТКРЫТОГО ТИПА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ ВНЕШНЕГО КОНТУРА

А.В. Крайнов

Томский политехнический университет
E-mail: Lux_veritatis@mail.ru

Проведено численное исследование сопряжённого теплообмена и гидродинамики при движении вязкой жидкости в открытой прямоугольной полости с учётом процесса её разрушения. Получены гидродинамическая картина течения вязкой жидкости и температурные поля для твёрдой и жидкой фаз. Изучено влияние динамических параметров и геометрических характеристик на формирование контуров образующихся кратеров.

Ключевые слова:

Сопряжённый теплоперенос, вязкая несжимаемая жидкость, гидродинамика, контур кратера, разрушение полости.

Key words:

Conjugate heat transfer, viscous incompressible fluid, hydrodynamics, crater contour, cavity damage.

На протяжении последних десятилетий наблюдается устойчивый интерес к исследованию конвективных течений в различных технических комплексах. Полости являются технологическими элементами всевозможных энергетических систем и производственных процессов различного уровня сложности таких отраслей промышленности, как энергетическая, металлургическая, горная, космическая и других, которые представляют собой открытые или закрытые контуры с разной геометрией, перенос тепла в которых осуществляется конвективной циркуляцией теплоносителя [1–5]. Процессы, связанные с изменением фазового состояния при плавлении материала, протекают в условиях аварийных ситуаций, возникающих в энергосистемах разного класса и различной сте-

пени опасности по мере развития опаснейших производств и усложнения технологических циклов в таких отраслях промышленности, как атомная, химическая и других [6, 7].

Рассматривается нестационарное взаимодействие жидкости с полостью (рис. 1). Цель данной работы — исследовать процесс разрушения открытой полости при взаимодействии с вязкой несжимаемой неизотермической жидкостью в условиях охлаждения внешнего контура.

Изучение процесса проводилось с использованием математической модели на основе системы уравнений Навье—Стокса в переменных вихрь (ω)—функция тока (ψ), уравнения энергии, уравнения теплопроводности для материала полости с соответствующими краевыми условиями

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right); \quad (3)$$

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

Численное решение гидродинамической задачи осуществлялось в области 2 (рис. 1). Фронт разрушения полости определяется с использованием условия $\theta \geq \theta_*$, где θ_* — температура плавления материала. В математической постановке задачи Fo — число Фурье, Re — число Рейнольдса.

На дне ($y=S$, $D < x < L$) и боковой стенке полости ($x=D$, $S < y < H$) выставляется условие непротекания, прилипания, а также граничное условие четвёртого рода для уравнения энергии:

а) по переменной x

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\partial \theta_1}{\partial y} - \left[\frac{Q \rho \nu}{\lambda (T_* - T_1^0)} + \text{Pr} \right] \frac{dy}{dt};$$

б) по переменной y

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial \theta_1}{\partial x} - \left[\frac{Q \rho \nu}{\lambda (T_* - T_1^0)} + \text{Pr} \right] \frac{dx}{dt},$$

где приняты следующие обозначения, отвечающие за введение добавочных членов: Q — теплота фазового перехода, λ_1 , λ — коэффициенты теплопроводности для твёрдой и жидкой фаз соответственно, ρ — плотность, ν — кинематическая вязкость, T_* — температура плавления материала, T_1^0 — начальная температура стенок полости, Pr — число Прандтля.

При этом скорости движения границы раздела между твёрдой и жидкой фазами в условиях изменения фазового состояния материала полости вдоль пространственных переменных x , y соответственно будут определяться следующим образом

$$V_1 = - \frac{x_i(t + \Delta t) - x_i(t)}{\Delta t};$$

$$V_2 = - \frac{y_i(t + \Delta t) - y_i(t)}{\Delta t}.$$

где x_i , y_i — координаты узла разностной сетки на границе раздела твёрдой и жидкой фаз по оси пространственной переменной x и y в момент времени $t + \Delta t$ и t соответственно; V_1 , V_2 — скорости движения границ раздела твёрдой и жидкой фаз в условиях изменения фазового состояния материала полости в направлении по оси пространственной переменной x и y соответственно.

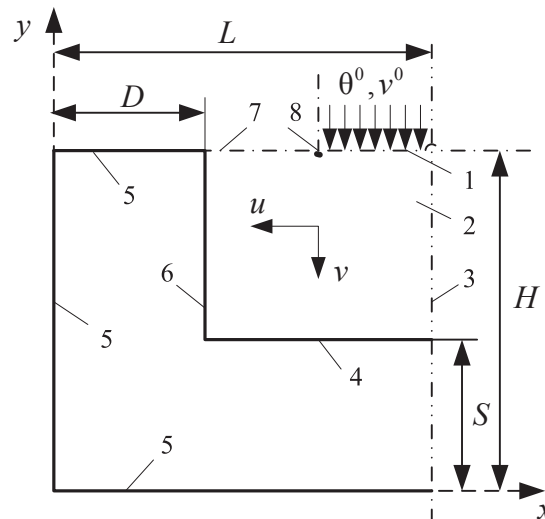


Рис. 1. Общая схема течения в прямоугольной полости и геометрия расчётной области: 1 — участок входа; 2 — гидродинамическая область; 3 — ось симметрии; 4, 6 — дно и боковая стенка полости (внутренний контур полости); 5 — внешние стенки полости (внешний контур полости); 7 — участок выхода; 8 — граница раздела между входным и выходным участками

Условия неразрывности тепловых потоков и непротекания заданы на оси симметрии струи ($x=L$, $S < y < H$). На участке выхода задавались условия «сноса» и «мягкое» граничное условие для скорости и температуры соответственно [8, 9]. Условия теплоизоляции задаются на внешних границах полости, за исключением донной области ($y=0$, $0 < x < L$), на которой задаются граничные условия третьего рода.

Постановка задачи сделана при следующих допущениях: 1) материал жидкой и твёрдой фаз идентичен (при реализации технологических процессов достаточно часто используются однородные материалы); 2) теплофизические параметры для материалов жидкой и твёрдой фаз приняты одними и теми же (рассматриваются однородные материалы, поэтому теплофизические характеристики представляются идентичными); 3) реализуется ламинарный режим течения (рассматриваемый режим течения является наиболее типичным для условий технологических циклов); 4) возможные эффекты газовыделения, обусловленные химическими и физическими процессами, не учитываются (в данной работе исследуется чистый процесс плавления материала полости, который в дальнейшем будет рассматриваться в условиях различных эффектов, сопровождающих процессы такого типа).

Методом конечных разностей решены система уравнений Навье—Стокса в переменных вихрь (ω)—функция тока (ψ), уравнение энергии и уравнение теплопроводности (1)–(4). Явным итерационным методом решены разностные аналоги уравнений Навье—Стокса. Разностные аналоги уравнений энергии и теплопроводности решены методом прогонки [8]. Граница затвердевания определяется с помощью критериального условия фазовых переходов $\theta \geq \theta_*$. При несовпадении криволинейной

границы в условиях изменения фазового состояния жидкости (плавления) с узлами сетки применялись разности с переменными шагами по координатам. Реализована разностная схема второго порядка точности на равномерных и неравномерных сетках.

Для проверки аппроксимации и сходимости численного решения в качестве тестовой рассматривалась задача о плоском течении в прямоугольной каверне с верхней стенкой, движущейся в своей плоскости с постоянной скоростью. Сравнение результатов по профилям продольной $u(y)$ и поперечной $v(x)$ составляющих скорости с данными [8] показало хорошее, в пределах $\pm 6\%$, согласование, а также по значениям функции тока при различных числах Рейнольдса $200 \leq Re \leq 1000$.

В качестве второй тестовой рассматривалась задача о сдвиговом течении с циркуляцией при малых числах Рейнольдса $20 \leq Re \leq 60$ [10]. Решалось бигармоническое уравнение для функции тока, так как известные подстановки исключают функцию вихря и непосредственно определяются поля неизвестной функции тока. Сравнение результатов по профилям функции тока в различных сечениях с данными, полученными в [10], показало хорошее, в пределах $\pm 4\%$, согласование.

Были также проведены вычисления на последовательности из 5–6 сгущающихся сеток для наиболее типичных режимов течения, и установлены значения сеточных параметров, при которых результаты расчетов не зависели от числа узлов разностной сетки.

На рис. 2, 3 приведены типичные результаты численных исследований для жидкой стали. Анализ установившегося поля течения выделяет области прямого и возвратного течения, которые хорошо видны на рис. 2.

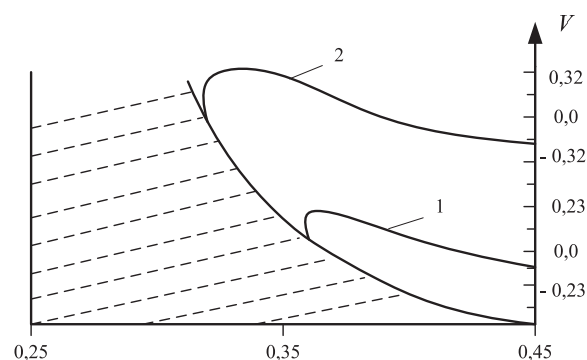


Рис. 2. Твёрдая фаза (заштрихована) и профили поперечной составляющей скорости v в сечениях: 1 – $y=0,128$; 2 – $y=0,459$ при $Re=600$, $Pr=0,979$, $\alpha=0,30$, где α – длина участка затекания

Характер распределения поперечной составляющей скорости качественно сохраняется по мере продвижения жидкости к основанию кратера, образующегося при разрушении полости. При этом поперечная составляющая скорости падает при возрастании продольной. При движении жидкости от основания до выходного участка наблюдается изменение характера распределения скорости,

обусловленное влиянием геометрических характеристик кратера. Продольная составляющая скорости падает, а поперечная начинает расти, что хорошо интерпретирует физическое представление о протекающем процессе.

На рис. 3 представлены контуры кратеров, образующиеся при разрушении полости в различные моменты времени при числах $Re=600$, $Pr=0,979$. Согласно проведённому анализу можно отметить, что контуры кратеров 1, 2, 3 в области $0,54 < x < 0,64$, $0,16 < y < 0,34$ более вытянуты вдоль оси симметрии по сравнению с полушириной лунки. С увеличением временных слоёв скорость плавления полости вдоль оси x существенно уменьшается по сравнению со скоростью плавления вдоль оси y – особенно отчётливо эта тенденция наблюдается на контурах 2, 3.

Из проведённого анализа полученных данных следует, что при охлаждении внешнего контура полости (донной части) время разрушения стенок постепенно увеличивается по сравнению с временем разрушения в условиях неохлаждаемого внешнего контура. Кроме того, время разрушения полости будет существенно зависеть от размеров охлаждаемого контура и длины участка затекания.

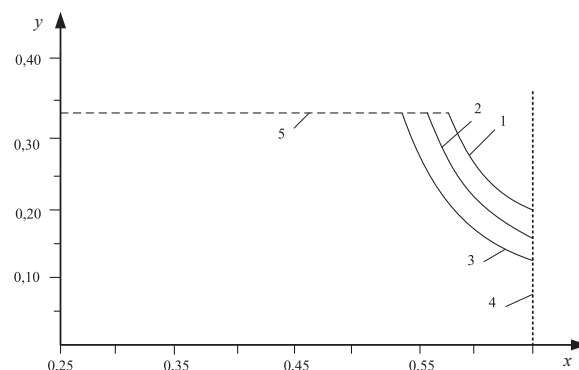


Рис. 3. Контуры кратеров, образующиеся при разрушении полости в различные моменты времени: 1) $2,5 \cdot 10^{-4}$; 2) $3,4 \cdot 10^{-4}$; 3) $4,1 \cdot 10^{-4}$; при числах $Re=600$, $Pr=0,979$. Здесь 4 – ось симметрии; 5 – граница раздела фаз

Показано, что наибольшее влияние на скорость процесса разрушения полости открытого типа при взаимодействии с вязкой несжимаемой неизотермической жидкостью оказывают охлаждаемый внешний контур со стороны донной части, размер участка затекания и динамические характеристики, что позволяет выявить особенности образования кратеров, границы которых соответствуют фронту фазового перехода материала.

Установленные закономерности имеют хорошую физическую интерпретацию, что позволяет сделать вывод о целесообразности дальнейшего развития предлагаемой математической модели в условиях сложных геометрий областей течения, фазового перехода вещества и неоднородности физических характеристик.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00201 на 2012–2014 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флемингс М. Процессы затвердевания. — М.: Мир, 1977. — 423 с.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Анищенко Л.М. Высокотемпературные технологические процессы. Теплофизические основы. — М.: Наука, 1985. — 172 с.
3. Крайнов А.В., Швалова Г.В. Основы теплоэнергетики. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 164 с.
4. Логинов В.С., Крайнов А.В., Юхнов В.Е., Феоктистов Д.В., Шабунина О.С. Примеры и задачи по тепломассообмену. 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Изд-во «Лань», 2011. — 256 с.
5. Рассохин Н.Г., Локтионов В.В., Мухтаров Э.С., Орлов В.Е., Молодых К.Е., Ярошенко Н.И. Особенности поведения корпуса реактора ВВЭР-1000 в условиях тяжёлой аварии // Труды II Российской нац. конф. по теплообмену: Пленарные и общие проблемные доклады. Доклады на круглых столах. — М.: Изд-во МЭИ, 1998. — Т. 1. — С. 153–158.
6. Гаврилов П.М., Цыганов А.А. Тепломассообмен и внутренняя самозащищённость ядерных реакторов // Труды II Российской нац. конф. по теплообмену: Пленарные и общие проблемные доклады. Доклады на круглых столах. — М.: Изд-во МЭИ, 1998. — Т. 1. — С. 147–152.
7. Krainov A.V., Shvalova G.V. Heating plants and systems. — Tomsk: TPU Publishing House, 2012. — 115 с.
8. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. — М.: Наука, 1984. — 288 с.
9. Кузнецов Г.В., Крайнов А.В. Исследование сопряжённого теплообмена и гидродинамики при движении вязкой несжимаемой жидкости в каверне прямоугольного типа // Прикладная механика и техническая физика. — 2001. — Т. 42. — № 5. — С. 136–142.
10. Ши Д. Численные методы для решения задач теплообмена. — М.: Наука, 1988. — 544 с.

Поступила 22.01.2013 г.

УДК 536.46

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ РАСПЫЛЕНИЯ ВОДЫ НА ТЕМПЕРАТУРУ В СЛЕДЕ «ВОДЯНОГО СНАРЯДА»

О.В. Высокоморная, А.О. Марков*, М.Н. Назаров**, П.А. Стрижак, С.Р. Янов

Томский политехнический университет

*ЗАО «Сибирский энергетический научно-технический центр», г. Красноярск

**Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

E-mail: pavelspa@tpu.ru

С использованием нескольких моделей «водяных снарядов» малых размеров выполнено численное исследование макроскопических закономерностей испарения монодисперсной совокупности капель тонкораспыленной воды при прохождении через высокотемпературные продукты сгорания. Установлены зависимости интегральных характеристик тепломассопереноса от отношения площадей испарения и площадей, занимаемых «водяным снарядом». Определены условия распыления воды для эффективного снижения температуры в зоне горения.

Ключевые слова:

Высокотемпературные газы, продукты сгорания, испарение, капли воды, моделирование.

Key words:

High temperature gases, combustion products, evaporation, water drops, simulation.

Задачи разработки флегматизаторов горения и расчета параметров их оптимального распыления в зоне горения актуальны в связи со статистическими данными [1] по возрастающим материальным потерям, сопровождающим пожары различной степени сложности (особенно лесные). В таких условиях важную роль играют результаты научных исследований в направлении совершенствования существующих технологий тушения и создания новых. Одной из наиболее перспективных можно считать технологию тушения пожаров тонкораспыленной водой [2–5]. Однако до настоящего времени физические и теоретические основы этой технологии не разработаны в полной мере. Во многом это можно объяснить отсутствием результатов фундаментальных исследований макроскопических закономерностей взаимодействия

тонкораспыленной воды с высокотемпературными продуктами сгорания [4, 5].

Для решения этой проблемы в последние годы выполнен цикл численных исследований процессов тепломассопереноса и фазовых переходов при движении одиночной капли [6, 7], «тандема» [8] и группы из четырех [9] и пяти [10] капель тонкораспыленной воды через высокотемпературные продукты сгорания. Определены зависимости времен испарения (существования) капель от температуры продуктов сгорания, скорости движения, размеров и расстояния между каплями для нескольких систем «водяной снаряд–пламя» [6–10]. Проанализированы условия движения капель в струях тушащей жидкости [11]. Представляет интерес анализ условий распыления воды для эффективного снижения температуры в следе «водяного снаряда».