

Федюшкин А.И., Влияние переменности гравитационного поля Земли на конвективное течение и свободную поверхность жидкости. Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 11-13 ноября 2019 г, 1136-1140, 2020, ISBN 978-5-6042216-7-9

УДК 532.5.032

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ И СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТИ

А. И. Федюшкин

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлывского РАН (Москва)

Известно, что ускорение сила тяжести Земли \mathbf{g} не постоянно, а переменено по пространству и времени. Первые измерения гравитационного поля Земли были получены с Земли. Более точные нестационарные карты геоида Земли были сделаны со специальных искусственных спутников Земли, таких как GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) [1] и GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) (ESA) [2], которые были запущены с космодрома Плесецк российской ракетой «Рокот». Миссии данных спутников состояли в том, чтобы точно картографировать изменения в гравитационном поле Земли. Были уточнены гравитационные карты Земли и обнародованы на заседании Американского геофизического союза. В настоящее время продолжается миссия спутника GRACE-FO — это совместная работа США (NASA) и Германии (GFZ), которая была начата 22 мая 2018 года на ракете SpaceX Falcon 9 [3].

Переменность силы тяжести Земли вызывает особенности течений в мантии, в атмосфере в океане и приводят к искривлению свободной поверхности гидросферы. Эти изменения происходят вследствие нестационарных изменений геодинамических возмущений земной коры, которые в литературе называют короткоживущими подкорковыми локальными возмущениями (КПЛВ) [4–6]. Влияние на течение жидкости переменности поля силы тяжести Земли, в том числе КПЛВ, еще изучены плохо, хотя описание и прогнозирование характера влияния на гидросферу имеют не только принципиальное научное значение, но и практическую важность для метеорологии, экологии, навигации, транспорта и для других сфер жизни и деятельности человека.

Постановка задачи

В данной работе для случаев силы тяжести постоянной и линейной функции координаты рассмотрены две модельные задачи:

1) Задача-1, о тепловой конвекции несжимаемой жидкости в замкнутой квадратной области, подогреваемой сбоку (на вертикальных стенках заданы разные температуры и концентрации, горизонтальные стенки теплоизолированные и непротекаемые, $Gr = 10^4$, $Pr = 0.71$, $Sc = 10$, $L = 1$) в постоянном \mathbf{g}_0 и переменном поле силы тяжести $\mathbf{g}(x) = \mathbf{g}_0 L x_1$.

2) Задача-2, об изменении свободной поверхности в горизонтальном замкнутом слое длиной $L = 5$, наполовину заполненном водой, начальный момент находящейся в покое, при изменении поля силы тяжести от постоянного \mathbf{g}_0 к переменному $\mathbf{g}(x) = \mathbf{g}_0 L x_1$.

Математическая модель основана на численном решении системы уравнений Навье – Стокса для однородной несжимаемой жидкости и двухфазной системы «газ-жидкость» (1)–(4).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + F_j \quad (1)$$

$$\operatorname{div} U = 0 \quad (2)$$

УДК 532.252+536.248.2

ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ВИБРАЦИЙ НА ГИДРОДИНАМИКУ И ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ РОСТЕ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЗОННОЙ ПЛАВКИ

А. И. Федюшкин

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлinskого РАН (Москва)

Метод зонной плавки был предложен Уильямом Гарднером Пфанном в 1952 году [1]. Первые монокристаллы кремния методом зонной плавки были получены в 1952–1953 гг. компаниями Siemens и Bell Labs. В СССР промышленное производство кремния методом зонной плавки было налажено в 1963 году на Подольском химико-металлургическом заводе. Описание метода зонной плавки можно найти в [1–5]. Перед технологиями выращивания совершенных монокристаллов стоят задачи улучшения их однородности и увеличения производительности, то есть увеличения скорости роста кристаллов [3, 4]. Для решения этих задач необходимо организовать режим конвективного перемешивания расплава таким образом, чтобы выполнялись следующие условия: 1) тепло от растущего кристалла отводилось равномерно и оптимально быстро, 2) фронт затвердевания оставался плоским и 3) распределение примесей было равномерным по радиусу кристалла [5]. Авторы работы [6] дают обзор результатов роста кристаллов при вращательных и вибрационных воздействиях на поток расплава с целью управления ростом. Управление тепломассообменом при росте кристаллов можно осуществлять с помощью оптимального подбора геометрии, тепловых параметров, скоростью роста, а при различных механических контролируемых воздействиях (вращения, вибрации, магнитные и гравитационные поля) [7–12]. В работах [4–8] представлены результаты математического моделирования влияния, гравитации, вращательных и вибрационных воздействий на тепло- и массообмен при выращивании кристаллов методами Чохральского, Бриджмена и зонной плавки. Вопросы возникновения и устойчивости вибрационных течений рассмотрены в работах [13, 14]. В работе [15] впервые было отмечено, что подаваемые на кристалл колебания с частотой 50 Гц и амплитудой 100–500 мкм повышают весовую скорость роста до 4 раз. В работе [16] приводятся результаты по моделированию конвективного теплопереноса с учетом прикристаллизационной зоны (mushy zone) и дан обзор работ по различным моделям и исследованиям теплопереноса при получении материалов из растворов или расплавов с учетом mushy zone.

В данной работе приведены результаты численного исследования влияния вибраций на гидродинамику и теплоперенос при выращивании монокристаллов методом зонной плавки.

1. Постановка задачи и математическая модель

В методе безтигельной зонной плавки жидкая зона расплава имеет криволинейную свободную поверхность [1, 2], с наиболее нагретой центральной частью и двумя холодными фронтами фазового перехода: кристаллизации и плавления, расположенными сверху и снизу расплава (рис. 1а). В данной работе рассматривается упрощенная двумерная модель выращивания кристаллов методом безтигельной зонной плавки, движение кристалла не рассматриваются, предполагается, что вибрации создаются по закону: $z = A \cos(2\pi ft)$ с частотой f и малой амплитудой A . Математическое моделирование основано на численном решении осесимметричных нестационарных уравнений Навье — Стокса для несжимаемой

УДК 519.63 + 532.529.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНОГО КИПЕНИЯ ЖИДКОСТИ

А. И. Федюшкин

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлывского РАН (Москва)

Введение

Кипение жидкости — это процесс фазового перехода (парообразования) внутри жидкости при ее интенсивном нагревании. Процессы кипения имеют место во многих явлениях природы, в промышленных установках и технике, и важны для различных сфер деятельности человека. Управление кипением имеет важнейшее значение, например, в процессах охлаждения промышленных установок и электронных приборов. Кипение изучается давно и ему посвящено много научных работ (можно выделить работы отечественных ученых: С. С. Кутателадзе, Р. И. Нигматулина, В. И. Толубинского, Д. А. Лабунцова, В. В. Ягова). Процесс кипения зависит от многих параметров: свойств жидкости, условий теплообмена, свойств нагреваемой поверхности и т. д. Поэтому несмотря на актуальность понимания и использования процессов кипения, оно до сих пор изучено недостаточно для того чтобы его можно было полностью математически формализовать, и им можно было бы эффективно управлять.

Существуют различные режимы кипения и их классификации [1, 2], из них можно выделить пузырьковый и пленочный режимы кипения. При численном моделировании процессов пузырькового кипения существуют трудности, связанные, как с математическим описанием деталей двухфазного перехода (необходимостью использования некоторых эмпирических данных, например, таких, как определение мест зарождения и частоты отрыва пузырьков), так и с моделированием интенсивного двухфазного течения с изменяемым интерфейсом «жидкость-газ». В работах [3, 4] приведены математические модели (2D и 3D) кипения недогретой жидкости и результаты верификационных расчетов.

Постановка задачи

В данной работе рассматривается упрощенная модельная задача начального этапа формирования пузыря при пленочном кипении в вертикальном сосуде жидкости, подогреваемой снизу. На теплообмен при кипении влияют угол смачивания и площадь контакта пленки с нагреваемой поверхностью [1–7]. Рассмотрено несколько случаев: три значения угла смачивания нагретой поверхности ($\gamma = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$) и покрытие паровой пленкой (1 или 2 пузырями) дна сосуда (от 50 % до 100 % площади). Предполагается, что геометрия газовой пленки в начальный момент задана и анализируется ее изменение и динамика теплообмена для разных углов смачивания, площадей паровых пленок и свойств жидкости.

Математическая модель основана на численном решении системы нестационарных уравнений Навье — Стокса для двухфазной системы «жидкость-газ» с уравнением переноса энергии. Используется модель VOF (Volume Of Fluid) метод для определения интерфейса «жидкость-газ» [8]. Для этого решается уравнение переноса доли газовой фракции. Численное решение осуществляется методом контрольных объемов. Подробнее математическая модель описана в работах [3–6].

УДК 532.252+536.248.2

МКЭ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА

А. И. Федюшкин¹, Н. Г. Бураго¹, А. А. Пунтус²

¹Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлывского РАН (Москва)

²Московский авиационный институт

Введение

Перед технологиями выращивания совершенных монокристаллов стоят задачи улучшения их однородности и увеличения производительности, то есть увеличения скорости роста кристаллов [1–3]. Для решения этих задач необходимо организовать режим конвективного перемешивания расплава таким образом, чтобы выполнялись следующие условия: 1) тепло от растущего кристалла удалялось равномерно и как можно быстрее, 2) фронт затвердевания оставался плоским и 3) распределение примесей было равномерным по радиусу кристалла. Управление теплообменом при росте кристаллов можно осуществлять с помощью оптимального подбора геометрии, тепловых параметров, скорости роста, а также различных физико-механических контролируемых воздействий (вращения, вибрация, магнитные и гравитационные поля) [3–8]. Авторы работы [3] дают обзор результатов роста кристаллов при вращательных и вибрационных воздействиях на поток расплава с целью управления ростом. В работах [4–8] представлены результаты математического моделирования влияния гравитации, вращательных и вибрационных воздействий на теплообмен при выращивании кристаллов. Обзоры результатов математического моделирования теплопереноса при выращивании кристаллов и перспективы развития приведены в работах [9–10]. В работах [11–13] выполнено численное моделирование теплопереноса для вертикального метода Бриджмена с погруженным нагревателем. Погруженный нагреватель отделяет область расплава перед кристаллом и позволяет контролировать конвективное перемешивание вблизи фронта кристаллизации. Обзор по методу Бриджмена с погруженным нагревателем представлен в работе [12]. В работе [13] для метода Бриджмена с погруженным нагревателем экспериментально и численно исследовано влияние вращения погруженного нагревателя на форму фронта кристаллизации кристалла NaNO_3 и проведено сравнение численных и экспериментальных данных.

В данной работе представлены результаты численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) конвективного теплопереноса при выращивании монокристаллов методом Бриджмена. Показано влияние вращения, скорости кристаллизации и вибраций на теплоперенос в расплаве, на толщину пограничных слоев и распределение примеси в кристаллах. Численные методы и модели, используемые в данной работе при моделировании с помощью МКЭ изложены в работах [14–17].

1. Постановка задачи и математическая модель

Математическая модель

Осесимметричное нестационарное течение расплава описывается уравнениями Навье — Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска. Ниже записаны условия несжимаемости, уравнения движения в проекциях на радиальное окружное и осевое направления, уравнение теплопроводности и уравнение конвекции-диффузии примеси:

— эксперименты, выполненные в гидродинамической лаборатории «АО ОКБМ Африкантов», лаборатории реакторной гидродинамики НГТУ им. Алексева, в ИМСС УРО РАН. Выполнена верификация на основе сопоставления с данными DNS-моделирования, а также задачами с известным аналитическим решением.

Полученные в результате теплогидравлических расчетов нестационарные поля температур металлоконструкций передаются для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС). Для приложения температурных граничных условий используются специально разработанные программы, позволяющие провести интерполяцию результатов расчетов с CFD конечно-элементной модели на прочностную конечно-элементную модель и проводится расчет кинетики НДС в определяющих исчерпание ресурса режимах нагружения.

Расчеты накопленной поврежденности оборудования проводятся по методике механики поврежденной среды. Процесс накопления усталостных повреждений в материале оборудования по фактической истории их термосилового нагружения базируется на моделировании основных физических стадий: зарождения и развития микродефектов и их слияния с образованием макроскопической усталостной трещины. Энергетический подход, принятый для моделирования процессов накопления повреждений, позволяет учитывать главные особенности упругопластического деформирования материала опасных зон конструктивных элементов при сложном нестационарном термомеханическом нагружении: ярко выраженную локализацию процессов, обусловленную высоким градиентом нагрузок и конструктивно-технологической концентрацией напряжений; многоосность напряженно-деформированного состояния; вращение главных площадок тензоров напряжений и деформаций; нелинейное суммирование повреждений при изменении режимов нагружения.

Применение технологии численного эксперимента подтверждения назначенного ресурса оборудования судовых реакторных установок позволяет учесть весь спектр нагружающих факторов и особенностей конструктивного исполнения, повысить точность определения ресурсных характеристик оборудования и трубопроводов, значительно сократить время на проектирование конструкции и исключить их дорогостоящие натурные испытания.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТЕФАНА*

Н. Г. Бураго, А. И. Федюшкин

ИПМех РАН, Москва, Россия

В работе описан алгоритм решения методом конечных элементов задачи Стефана для моделирования процессов кристаллизации методом Бриджмена с погруженным нагревателем-вибратором.

Постановка задачи. Течение расплава описывается уравнениями Навье–Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, & \rho_0 d\mathbf{u}/dt + \nabla p &= \nabla \cdot (\rho_0 \nu \nabla \mathbf{u}) - \rho_0 g \beta (T - T_0) \mathbf{e}_z, \\ \rho_0 c_V dT/dt &= \nabla \cdot (k_T \nabla T), & dC/dt &= \nabla \cdot (D \nabla C), \end{aligned}$$

где использованы традиционные обозначения. Задачи рассматривались в условиях осевой симметрии, поэтому граничные условия удобно записать в цилиндрической

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственных программ АААА-А20-120011690132-4 и АААА-А20-120011690131-7.

Бураго Н.Г., Федюшкин А.И., Numerical solution of the Stefan problem. Пермские гидродинамические научные чтения : материалы всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова / Пермский государственный национальный исследовательский университет, 23-27, 2020. ISBN 978-5-7944-3563-4

УДК 519.63

Численное решение задачи Стефана

Н. Г. Бураго, А. И. Федюшкин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
119526, Москва, проспект Вернадского, 101, корп.1
email: burago@ipmnet.ru
fai@ipmnet.ru

В работе описан алгоритм решения задачи Стефана методом конечных элементов для моделирования процессов кристаллизации методом Бриджмена с погружным нагревателем-вибратором.

Ключевые слова: задача Стефана; МКЭ; рост кристаллов

Numerical solution of the Stefan problem

N. G. Burago, A. I. Fedyushkin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences, Prospekt Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russia
email: burago@ipmnet.ru,
fai@ipmnet.ru

The paper describes an algorithm for solving the Stefan problem by the finite element method for modeling crystallization processes by the Bridgman method with an immersed heater-vibrator.

Keywords: Stefan problem; FEM, crystal growth

1. Introduction

This paper presents the results of numerical modeling by the finite element method of convective heat and mass transfer during the growth of single crystals by the vertical Bridgman method with a submerged heater. Numerical calculations were performed using the implicit matrixless finite element method based on the iterative process of conjugate gradients and significantly reducing the requirements for RAM and computer speed. The effects of gravity, rotation, crystallization rate and vibration on heat and mass transfer in the melt, the geometry of the crystallization front, and the thickness of the boundary layers were studied. It is shown that the above effects can be effectively used to control the distribution of impurities in crystals grown by the vertical Bridgman method.

2. Statement of the problem

The melt flow is described by the Navier-Stokes equations for an incompressible fluid in the Boussinesq approximation:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho_0 \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \nabla p = \nabla \cdot (\rho_0 \nu \nabla \mathbf{u}) - \rho_0 g \beta (T - T_0) \mathbf{e}_z$$

ячейковый характер (рис. 7), вследствие чего массоперенос вдоль слоя может быть затруднен, а распределение температуры вдоль слоя увеличивается периодически.

Заключение. При $Ra > 10^7$ для воды возникают противотоки и при увеличении числа Рэлея ($Ra > 5 \cdot 10^8$) в горизонтальном слое увеличивается число подслоев с противотоком. С уменьшением числа Прандтля интенсивность противотока возрастает. Течения при числах Прандтля равных или меньше 0,01 качественно отличаются от течения жидкости с нулевым числом Прандтля, поэтому приближение нулевого значения числа Прандтля не всегда может быть корректным.

1. Полежаев В.И. и др. Конвективные процессы в невесомости. — М.: Наука, 1991. — 240 с.
2. Кирдяшкин А.Г., Полежаев В.И., Федюшкин А.И. Тепловая конвекция в горизонтальном слое при боковом подводе тепла // ПМТФ. — 1983. — №6. — С. 122–128.
3. Федюшкин А.И., Пунтус А.А. Нелинейные особенности ламинарных течений жидкости на Земле и в невесомости // Труды МАИ. — 2018. — №102.

ДИНАМИКА ЖИДКОГО МОСТИКА ПРИ КОАЛЕСЦЕНЦИИ КАПЕЛЬ*

А.И. Федюшкин, А.Н. Рожков

ИПМех РАН, Москва, Россия

В работе экспериментально и численно исследуется динамика слияния двух капель одной жидкости. В начальный момент две капли жидкости соприкасаются в воздухе и рассматривается динамика изменения формы капель и мостика между каплями. С помощью численного моделирования для двухфазной системы «жидкость–воздух» показано изменение форм капель во времени для разных свойств жидкостей. Данные численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными.

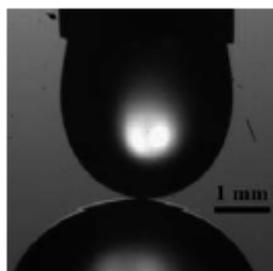


Рис. 1. Начальное расположение капель в эксперименте [1]

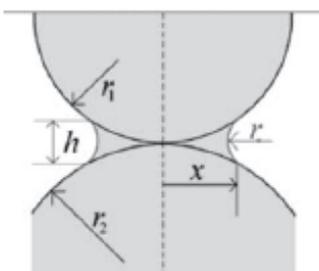


Рис. 2. Схема мостика в эксперименте [1]

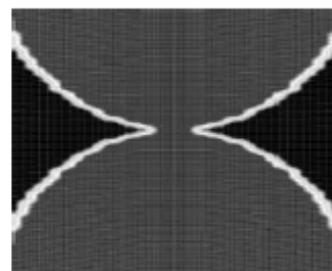


Рис. 3. Схема начального расположения капель в математической модели

Постановка задачи. На рис. 1 и 2 показаны фотография начального расположения капель и в эксперименте и схема мостика в начальный момент расположения капель в эксперименте [1]. На рис. 3 показана зона расчетной области математической модели в начальный момент соприкосновения капель. В математической модели предполагается, что мостик в начальный момент времени сформировался мгновенно и радиус начального мостика для капель с диаметром $d = 1$ мм был равен $R_m = x = 5 \cdot 10^{-4}$ мм (рис. 2 и 3).

*Работа выполнена при финансовой поддержке гос. программы АААА-А20-120011690131-7.

Федюшкин А.И., Пунтус А.А., О необходимости соединения учебного и научного процессов при обучении студентов и аспирантов вычислительной гидродинамике. Пермские гидродинамические научные чтения : материалы всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти и профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова / Пермский государственный национальный исследовательский университет, 413-423, 2020. ISBN 978-5-7944-3563-4

УДК 378.147

О необходимости соединения учебного и научного процессов при обучении студентов и аспирантов вычислительной гидродинамике

А. И. Федюшкин^а, А. А. Пунтус^б

^а Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 119526, Москва, проспект Вернадского, 101, корп.1
email: fai@ipmnet.ru

^б Московский авиационный институт, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
email: artpuntus@yandex.ru

Опыт реализации процесса активного взаимодействия учебного и научного процессов в институте № 8 «Информационные технологии и прикладная математика» Московского авиационного института во взаимодействии с лабораторией «Механики сложных жидкостей» Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН показал, что кооперации вуза и сотрудников академических институтов играет существенную роль при подготовке специалистов в области прикладной математики, приводятся примеры результата активного привлечения студентов в процессе обучения в высшей школе к научно-исследовательской работе, что способствует подготовке высококвалифицированных специалистов на основе соединения учебного и научного процессов обучения студентов. Главной целью такого взаимодействия учебной и научной деятельности при подготовке специалистов в вузе является привитие будущим инженерам навыков научного подхода к решаемым инженерным задачам. Каждый из таких студентов подключаясь к научно-исследовательской работе, достигает заметных успехов в учёбе и научной деятельности и в итоге становится квалифицированным творческим специалистом и молодым учёным.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, квалифицированные специалисты, учебный процесс, научная работа.

On the need to combine educational and scientific-research processes in teaching CFD modeling to students

A. I. Fedyushkin^a, A. A. Puntus^b

^a Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences, Prospekt Vernadskogo, 101-1, Moscow, 119526, Russia
email: fai@ipmnet.ru

^b Moscow Aviation Institute, Volokolamsk highway, 4, Moscow, 125993, Russia,
email: artpuntus@yandex.ru

Пунтус А.А., Федюшкин А.И., О соединении учебного и научного процессов в МАИ. Фундаментальные проблемы обучения математике, информатике и информатизации образования: сборник тезисов докладов международной научной конференции, посвященной 180-летию педагогического образования в г. Ельце, 102-105, 2020. ISBN: 978-5-00151-145-8

$$W_2 = 14 \cdot 0,25 + 16 \cdot 0,12 + (-13) \cdot 0,13 + 14 \cdot 0,5 = 10,7$$

$$W_3 = 18 \cdot 0,25 + 18 \cdot 0,12 + (-12) \cdot 0,13 + 13 \cdot 0,5 = 11,6$$

$W = \max\{W_i\} = W_1$, следовательно, фирме рекомендуется приобрести пакет акций π_1 , как критерий минимума среднего риска.

В некоторых случаях используется матрица рисков (R_{ij}) ; $i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, n$.

Под риском понимается потерянный выигрыш: разность между максимально возможным для варианта внешних условий выигрышем и фактическим выигрышем.

Построим матрицу рисков для рассмотренной выше задачи, но возьмем другие значения пакетов акций для облегчения решения:

π_1 -рост 10, стабильное состояние 6, снижение -7;

π_2 -рост 6, стабильное состояние 4, снижение -3;

π_3 -рост 8, стабильное состояние 3, снижение -2.

$$(R_{ij}) = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ 2 & 15 & 0 & 0 \\ 4 & 2 & 13 & 2 \\ 0 & 0 & 12 & 3 \end{pmatrix}$$

Результаты принятия решений вычисляются по формуле: $W_i = \sum_{j=1}^n R_{ij} \cdot p_j$, $i = 1, \dots, m$.

$$W_1 = 2 \cdot 0,25 + 15 \cdot 0,12 + 0 \cdot 0,13 + 0 \cdot 0,5 = 2,3$$

$$W_2 = 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,12 + 13 \cdot 0,13 + 2 \cdot 0,5 = 3,93$$

$$W_3 = 0 \cdot 0,25 + 0 \cdot 0,12 + 12 \cdot 0,13 + 3 \cdot 0,5 = 3,06$$

$W = \min\{W_i\} = W_1$, следовательно, фирме рекомендуется приобрести пакет акций π_1 .

Обсуждение и заключение. Приведенные примеры показывают, что достаточно сложная экономическая задача математическими методами теории игр решается просто и наглядно. А, значит, будущие экономисты должны знать математическую теорию игр и владеть математическими методами решения экономических задач.

О СОЕДИНЕНИИ УЧЕБНОГО И НАУЧНОГО ПРОЦЕССОВ В МАИ

А.А. Пунтус¹, А.И. Федюшкин²

¹Московский авиационный институт (Россия), профессор, arpuntus@yandex.ru
²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (Россия), с.н.с., fat@ipmnet.ru
Ключевые слова: образование, наука, исследование, квалификация, специалист.

ON THE CONNECTION OF EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC PROCESSES IN MAI

A.A. Puntus¹, A.I. Fedyushkin²

¹Moscow Aviation Institute (Russia), professor, arpuntus@yandex.ru
²Institute of Problems of Mechanics A.Yu. Ishlinsky RAS (Russia), senior researcher, fat@ipmnet.ru
Keywords: education, science, research, qualification, specialist.

~ 102 ~

Введение. Задача совершенствования подготовки высококвалифицированных специалистов в вузе является как традиционно актуальной задачей, так и особенно актуальной задачей в настоящее время – время активного развития научно-технического прогресса. Решению данной проблемы способствует развитие и совершенствование различных форм подготовки высококвалифицированных специалистов на основе соединения учебного и научного процессов обучения студентов. Важная основополагающая роль при этом состоит в определении содержания взаимодействия данных процессов и одновременно определения его конечной цели. Вне всякого сомнения, если поставить конечной целью данного взаимодействия задачу воспитания из возникающего большинства студентов потенциальных квалифицированных инженерно-технических и научных сотрудников, то эта цель в полном объеме может оказаться не реализуемой. Но, с другой стороны, даже сомнение в необходимости привлечения студентов к различным видам выполнения самостоятельной творческой научно-исследовательской деятельности безусловно может нанести в этом случае совершенно непоправимый вред качеству подготовки будущих специалистов.

Материалы и методы. Опыт реализации процесса активного взаимодействия учебного и научного процессов в институте № 8 «Информационные технологии и прикладная математика» Московского авиационного института во взаимодействии с лабораторией «Механика сложных жидкостей» Института проблем механики РАН показал, что главной целью такого взаимодействия учебной и научной деятельности при подготовке специалистов в вузе является привитие будущим инженерам навыков научного подхода к решению инженерным задачам. Наряду с совершенствованием учебного процесса весьма эффективным средством улучшения качества подготовки специалистов стало широкое привлечение студентов, в том числе на основании отмеченного сотрудничества, к творческой деятельности – научно-исследовательской работе студентов (НИРС). Этой конечной целью и должны быть получены различные формы соединения учебного и научного процессов. Участствуя в НИРС, будущий специалист убеждается в необходимости самостоятельного поиска путей постановки и решения задач, приобретает навыки творчества. Нормой его поведения становится осознанное отношение к активной трудовой деятельности, что обеспечивает его готовность к самостоятельной профессиональной деятельности.

На современном этапе развития НИРС, многообразие её форм и методов термин НИРС стал собирательным. Он включает в себя самые различные стороны учебной, научной, воспитательной и организационной деятельности вуза, которая обеспечивает:

- условия успешного овладения студентами своей специальностью;
- подготовку студентов к самостоятельной творческой деятельности;
- развитие навыков использования полученных знаний в практической работе;
- формирование потребности и умения постоянно накапливать и совершенствовать знания;

- расширение научно-технического кругозора;
- воспитание всесторонне развитой личности.

Решить вопросы совершенствования творческой подготовки студентов можно только на основе всё большего соединения НИРС с учебным процессом, когда НИРС становится его полноправной формой, а учебный процесс, в свою очередь, помогает решать научно-технические, производственные и общественно-воспитательные задачи вуза.

Для реализации данных положений необходимо постоянно увеличивать сложность и объем знаний, умений и навыков, приобретаемых студентами в учебное и внеучебное время, обеспечивать преемственность методов и форм подготовки специали-

~ 103 ~

Результаты математического моделирования показали, что вибрационным воздействием возможно получить более плоский фронт кристаллизации.

Показано существенное влияние расположения и формы вибратора на распределение примеси не только в расплаве, но и в кристалле, которые необходимо учитывать при определении оптимальных вибрационных режимов для получения совершенных кристаллов.

1. *Федюшкин А.И., Иванов К.А.* Гидродинамика и теплообмен при вибрационных воздействиях на расплав в процессах выращивания монокристаллов. — Препринт / ИПМех РАН. №1085. — М., 2014. — 107 с.
2. *Fedyushkin A., Bourago N., Polezhaev V., Zharikov E.* The influence of vibration on hydrodynamics and heat-mass transfer during crystal growth // *J. Crystal Growth*. — 2005. — V. 275. — P. e1557–e1563.
3. *Fedyushkin A.* The gravitation, rotation and vibration — controlling factors of the convection and heat — mass transfer // *Proc. of 4th ICCHMT, Paris, France, 2005*. — P. 948–951.

ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗНЫХ ЧИСЛАХ ПРАНДТЛЯ*

А. И. Федюшкин

ИПМех РАН, Москва, Россия

В работе представлены результаты численного решения задачи о тепловой конвекции несжимаемой жидкости в вытянутом по горизонтали слое с боковым подводом тепла. Данная задача характеризуется тремя безразмерными числами Рэлея (Ra), Прандтля (Pr), отношением сторон слоя ($L/H \gg 1$) и граничными условиями. Данная задача изучалась многими авторами аналитически, экспериментально и численно, обзоры можно найти в [1–3]. В данной работе рассмотрено влияние граничных условий и чисел Рэлея и Прандтля на структуру течения и на существование противотоков. Показано, что для ламинарных режимов конвекции ($Ra \geq 2 \cdot 10^5$) течения при числах Прандтля меньше 0,01 качественно отличаются от течения жидкости с нулевым числом Прандтля, поэтому приближение нулевого значения числа Прандтля не всегда может быть корректным.

Постановка задачи. Геометрия, расчетной области и граничные условия показаны на рис. 1. На рис. 1 также показаны изолинии функции тока и изотермы при конвективном течении с одновихревой структурой для случая $Ra = 2 \cdot 10^5$, $Pr = 5,8$, $L/H = 12,71$. На боковых стенках заданы постоянные значения температуры T_1 и T_2 ($T_1 < T_2$), для скорости на твердых границах заданы условие прилипания и непротекания. На горизонтальных стенках для температуры задано условие теплоизоляции (либо задано линейное распределение температуры). Математическая модель основана на численном решении системы нестационарных 2D-уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска [1–3].

Результаты численного моделирования. Влияние числа Рэлея на структуру течения при одинаковых параметрах можно увидеть, сравнив результаты моделирования для воды при $Ra = 2 \cdot 10^5$ (рис. 1) и при $Ra = 10^8$ (рис. 2). При $Ra = 2 \cdot 10^5$ течение имеет одновихревую структуру, которая начинает изменяться при $Ra \geq 10^6$ с образованием противотоков внутри слоя (рис. 2–4). Сравнение результатов расчета (профилей скорости и температуры) с экспериментальными данными приведено

*Работа выполнена при финансовой поддержке гос. программы АААА-А20-120011690131-7.

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА ПОГРАНИЧНЫЕ СЛОИ В ЗАДАЧАХ СВОБОДНОЙ И ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ*

А. И. Федюшкин

ИПМех РАН, Москва, Россия

Изучение разнообразных вибрационных воздействий на жидкие среды проводится уже около 200 лет, начиная с работ М. Фарадея (1831 г.) и Л. Рэлея (1883 г.), вследствие возникновения большого многообразия важных гидродинамических явлений, вызванных вибрационными воздействиями, данные исследования актуальны и в настоящее время.

В данной работе обобщаются результаты математического моделирования конвективного теплопереноса, и анализ влияния вибраций на пограничные слои в расплавах, а также на форму фронта кристаллизации при выращивании монокристаллов методами Бриджмена, Чохральского и плавающей зоны. Рассмотрены управляемые гармонические вибрационные воздействия на расплав, создаваемые либо частью границы этого жидкого объема или погруженным в расплав вибратором, с учетом и без учета следующих факторов: излучения, вращения, гравитационной и термокапиллярной конвекции. Подробные постановки задач описаны в работах [1–3].

В работе показано, что вибрации могут интенсифицировать перемешивание, теплоперенос в расплаве, а также выполаживать фронт кристаллизации, и уменьшать толщины пограничных слоев (динамического, температурного и концентрационного), что может приводить к увеличению температурного градиента на фронте кристаллизации и увеличению скорости роста кристаллов. Последний факт очень важен при выращивании кристаллов, так как влияет на производительность и на совершенство кристаллов.

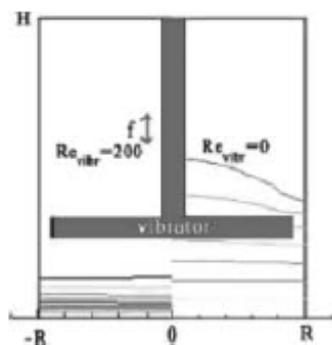


Рис. 1. Изотермы в расплаве NaNO_3 ($Pr = 5,43$) (справа — без вибраций, слева — с вибрациями $Re_{vibr} = 200$)

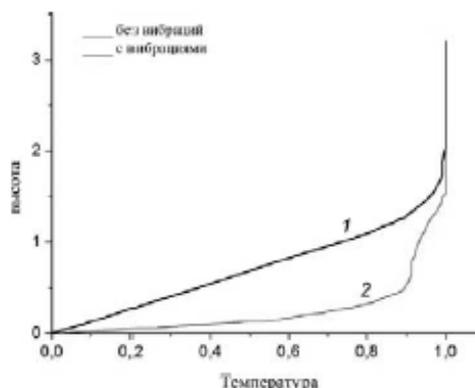


Рис. 2. Вертикальные профили температуры ($r = 0,75$) в расплаве NaNO_3 ($Pr = 5,43$) (1 — без вибраций, 2 — с вибрациями $Re_{vibr} = 200$)

На рис. 1 и 2 показаны изотермы и профили температуры в расплаве NaNO_3 ($Pr = 5,43$ — число Прандтля) (в правых частях рисунков — без вибраций, в левых — с вибрациями $Re_{vibr} = 200$, где $Re_{vibr} = A\omega R/\nu$ — число Рейнольдса виб-

*Работа выполнена при финансовой поддержке гос. программы АААА-А20-120011690131-7.

Федюшкин А.И., Пунтус А.А., Обучение студентов моделированию процессов гидродинамики и теплопереноса. Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАИ'2020), 6–13 сентября 2020 г., Алушта, 746–748, 2020 ISBN 978-5-4316-0699-1

4. Баландина Л.А., Давидян Г.Р., Кураченкова Г.Ф., Симонова Е.П. Русский язык и культура речи: Учебное пособие для аудиторской и самостоятельной работы студентов-нефилологов ВУЗов. — 2012. — 256 с. (ISBN 978-5-211-06325-9).
5. Жарков Е.А., Кибзун А.И., Мартюшова Я.Г., Мхитарян Г.А. Основные междисциплинарные аспекты разработки и программной реализации электронных учебников по техническим дисциплинам на примере СДО МАИ // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2019. — Т. 15, №2. — С. 507–515. — DOI: 10.25559/SITITO.15.201902.507-515.

ОБУЧЕНИЕ СТУДЕНТОВ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

А.И. Федюшкин¹, А.А. Пунтус²

¹ИПМех РАН, Москва, Россия; ²МАИ, Москва, Россия

Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics — CFD) является важным инструментом для решения и исследования задач аэрогидродинамики и теплообмена. Возросший интерес к CFD в последние двадцать лет связан с развитием вычислительной техники и появлением новых эффективных численных методов, позволившие решать новые задачи. Актуальность подготовки высококвалифицированных CFD-специалистов продиктована необходимостью проведения фундаментальных научных исследований и потребностью решения широкого диапазона прикладных задач.

В настоящее время подготовка специалистов по CFD востребована не только в традиционных областях науки и техники (таких как механика, физика, химия, авиация, космонавтика, атомная и тепловая энергетика, машиностроение, метеорология, металлургия и т.д.), но и в смежных нетрадиционных для гидродинамики областях, таких как, например, биология, медицина, спорт, строительство, легкая и пищевая промышленность и т.д. Поэтому в России наряду с обучением студентов технических вузов базовым предметам, таким, как физика, химия, механика, математика, существует острая необходимость получения образования студентами в области CFD-моделирования. В западных странах уже на протяжении более чем 25 лет основы CFD преподают в колледжах, используя специальные обучающие программные средства. Таким образом в университетах студенты за время обучения могут получить больше знаний и опыта моделирования, что сказывается на их квалификации. Опыт кооперации Института проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН) и Института №8 «Информационные технологии и прикладная математика» МАИ в обучении студентов численному моделированию процессов гидродинамики и теплообмена также показал, что для качественной подготовки специалистов необходимо не менее двух лет. В России в настоящее время перестройка среднего и высшего образования с сокращением учебных программ и времени обучения студентов технических ВУЗов, сделали возможность подготовить высококвалифицированных специалистов в области CFD-моделирования очень проблематичной. Президент РАН А.М. Сергеев об образовании в вузах сказал на заседании рабочей группы по оценке креативности школьников: «В университетском образовании наблюдается деградация, выпускники все меньше подходят для того, чтобы становиться учеными», сказал на заседании рабочей группы по оценке креативности школьников [1]. Вице-президент РАН А.Р. Хохлов предложил ввести внешний экзамен для проверки качества

СТРУКТУРЫ ЛАМИНАРНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ
В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ

Федюшкин А. И.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлывского РАН, Москва

Рассмотрена задача о тепловой конвекции несжимаемой жидкости в вытянутом по горизонтали слое с боковым подводом тепла. Представлены результаты о влиянии граничных условий и чисел Прандтля на структуру конвективного течения и распределение температуры. Моделирование основано на численном решении системы нестационарных 2D уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости. Показаны нелинейные особенности конвективных течений в горизонтальных слоях жидкости, в частности, возникновение внутри слоя противотока – течения жидкости с направлением противоположным основному конвективному течению. Проведено моделирование при малых числах Прандтля, а также при числе Прандтля равном нулю. Ламинарные конвективные течения при числах Прандтля $Pr < 10^{-2}$ (при числе Рэлея $Ra > 10^6$) качественно отличаются от течения жидкости с нулевым числом Прандтля, поэтому приближение нулевого значения числа Прандтля не всегда может быть корректным. Показано, что при умеренных числах Рэлея в длинных горизонтальных слоях тепловая ламинарная конвекция (без наличия примесей и концентрационной конвекции) способна создавать устойчивую вертикальную стратификацию жидкости по плотности и, как следствие, слоистые структуры течения.

Введение. В работе представлены результаты численного решения задачи о тепловой конвекции несжимаемой жидкости в вытянутом по горизонтали слое с боковым подводом тепла при различных граничных условиях и числах Прандтля. Данная задача характеризуется тремя безразмерными числами Рэлея (Ra), Прандтля (Pr), отношением сторон слоя ($L/H \gg 1$) и граничными условиями. Задача с боковым подогревом отличается от задачи Рэлея – Бенара тем, что конвективное течение теряет устойчивость при сколь угодно малом значении числа Рэлея [1]. Задача о конвекции жидкости в горизонтальном слое изучалась во многих работах, например, следующих работах: аналитически в [1, 3, 4], экспериментально в [5, 6] и численно в [2, 4, 6–8]. Во многих случаях конвективные течения имеют свои особенности, которые не описываются решениями, полученными вследствие линейных приближений и их нельзя экстраполировать из аналитических решений. В этих случаях пользуются численным моделированием. В данной работе рассматриваются особенности конвективных течений в длинных горизонтальных слоях при различных значениях чисел Рэлея, Прандтля и разных граничных условиях. Особенности стационарных течений могут заключаться, например, в образовании крупномасштабной многочечковой периодической структуры с определенным волновым числом [1], например, таких как показано на рис. 2, либо в образовании различных стационарных горизонтальных слоистых структур течения с противотоками внутри слоя (где возникают циркуляционные течения направленные навстречу основному), как показано на рис. 3–6. Результаты моделирования показали, что возникновение слоистых структур может быть

обусловлено образованием вертикальной стратификации по плотности, которая может создаваться тепловой конвекцией (без наличия примеси и концентрационной конвекции).

Постановка задачи и математическая модель. Рассматривается задача о тепловой конвекции несжимаемой жидкости в вытянутом по горизонтали слое в поле силы тяжести при боковом подводе тепла. В данной работе будут представлены результаты для слоев с отношением длины к высоте $L/H = 12.71$, для случая теплоизолированных горизонтальных границ, кроме отдельных результатов, представленных на рис. 2. Схема расчетной области, геометрия, граничные условия и структура течения при малых числах Рэлея показаны на рис. 1. (Все результаты представлены для случая теплоизолированных горизонтальных границ, кроме результатов на рис. 2). В математической модели на боковых стенках заданы постоянные, но разные значения температуры T_1 и T_2 ($T_1 < T_2$), а для скорости – условие прилипания. На горизонтальных стенках были рассмотрены следующих граничные условия: для скорости – условие прилипания или условие проскальзывания (свободная поверхность), для температуры – условие теплоизоляции, либо задан линейный профиль температуры (рис. 1). Математическая модель основана на решении системы нестационарных 2D уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска. Для безразмеривания в выбраны следующие масштабы: высота слоя H , максимальная разность температур $(T_1 - T_2)$, а время и скорость безразмерны через среднюю вязкость. Численное решение уравнений Навье – Стокса осуществлялось двумя численными методами: конечно-разностным (МКР) и методом контрольных объемов (МКО). Результаты расчетов, полученные разными методами, сравнивались между собой, а также сравнивались

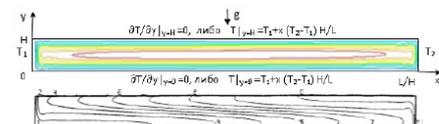


Рисунок 1 – Схема расчетной области и граничные условия. Изолиния функции тока (вверху) и изотермы (внизу) ($Ra = 2 \cdot 10^6$, $Pr = 5.8$).



Рисунок 2 – Изолиния функции тока (вверху) и изотермы (внизу) ($Ra = 2 \cdot 10^6$, $Pr = 0.01$, $T|_{y=0,y=H} = T_1 + x(T_2 - T_1)H/L$)

Федюшкин А.И., Влияния управляемых вибраций на гидродинамику и теплоперенос при росте кристаллов. Современные проблемы механики сплошной среды : труды XX Международной конференции (Ростов-на-Дону, 18–21 июня 2020 г.) : в 2 т (2), 236-240, 2020. ISBN 978-5-9275-3488-3 (Т. 2) ISBN 978-5-9275-3486-9

ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ВИБРАЦИЙ
НА ГИДРОДИНАМИКУ И ТЕПЛОПЕРЕНОС
ПРИ РОСТЕ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЗОННОЙ ПЛАВКИ

Федюшкин А. И.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишатаева РАН, Москва

В работе приведены результаты численного исследования влияния гармонических поступательных вибраций на гидродинамику и теплоперенос при выращивании монокристаллов методом зонной плавки. Показано влияние управляемых вибраций на толщину пограничных слоев и градиент температуры на фронте кристаллизации полупроводниковых материалов.

Введение. Метод зонной плавки был предложен Уильямом Гарднером Пфаном в 1952 году [1]. Перед технологиями выращивания совершенных монокристаллов стоят задачи улучшения их однородности и увеличения производительности, в частности, увеличения скорости роста кристаллов. Теплообмен и гидродинамика расплава являются важными факторами, влияющими на рост кристаллов. Тепло-массообмен при росте кристаллов можно управлять с помощью подбора геометрии, тепловых условий, скорости роста, а также при различных контролируемых воздействиях (вращения, вибрация, магнитные и гравитационные поля). В [2] дан обзор работ, посвященных росту кристаллов при вращательных и вибрационных воздействиях на поток расплава с целью управления ростом. В работе [3] было показано влияние вращения на распределение примеси в кристалле при росте методом Бриджмена и указаны оптимальные режимы для более однородного распределения примеси. В работах [4–6] представлены результаты математического моделирования влияния, гравитации, вращательных и вибрационных воздействий на тепло- и массообмен при выращивании кристаллов методами Бриджмена [4, 5] Чокральского [4, 6], и зонной плавки [4].

В данной работе приведены результаты численного исследования влияния вибраций на гидродинамику и изменение градиентов температуры на фронте кристаллизации при выращивании монокристаллов методом зонной плавки.

Постановка задачи. Метод зонной плавки заключается в том, что расплавляется узкая часть слитка (часто поликристаллического) и затем перемещением слитка или температурного поля происходит его перекристаллизация и получение монокристалла. В поле силы тяжести форма расплавленной зоны отличается от формы твердого слитка (рис. 1). Для сокращения времени расчета, форма плавающей зоны рассчитывалась до расчета гидродинамики и оставалась постоянной при дальнейших расчетах гидродинамики и теплопереноса (влиянием гидродинамики на форму плавающей зоны пренебрегалось). В работе рассматривается вертикальный метод плавающей зоны, когда вектор силы тяжести направлен параллельно оси слитка (плавающей зоны) и форма расплавленной зоны предполагается имеет осевую симметрию (рис. 1). Для дополнительного перемешивания

Влияния управляемых вибраций на гидродинамику и теплоперенос 237

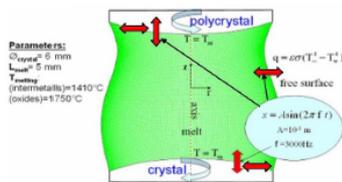


Рисунок 1 – Математическая модель плавающей зоны

расплава и симметризации теплового поля верхняя и нижняя границы плавающей зоны (нерасплавленные части слитка) вращаются в противоположные стороны.

Для определения границы раздела (формы плавающей зоны) использовался нестационарный VOF (Volume Of Fluid) метод повышенной точности с учетом угла смачивания и поверхностных сил. Начальная форма плавающей зоны выбиралась цилиндрической с радиусом равным твердому слитку и высотой, определенной по изотерме плавления (но не более полутора диаметров) и конечная форма жидкой зоны определялась в результате расчета с учетом баланса сил поверхностного натяжения и давления. В методе безыгельной зонной плавки жидкая зона расплава имеет криволинейную свободную поверхность [1], с наиболее нагретой центральной частью и двумя холодными фронтами кристаллизации (и плавления) расположенными сверху и снизу расплава. В работе использовалась осесимметричная двумерная модель безыгельной зонной плавки с поступательными вибрационными воздействиями, подчиняющимися гармоническому закону, например, для вертикальных вибраций можно записать $z = A \sin(2\pi f t)$, где f – частота, A – амплитуда (малая).

Математическая модель. Математическое моделирование основано на численном решении нестационарных уравнений Навье – Стокса в 2D осесимметричной постановке для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска и уравнений конвективного переноса тепла. Результаты были получены с помощью моделирования на основе численного решения уравнений Навье – Стокса и уравнения сохранения энергии в подвижной расчетной области с использованием динамически изменяемой сетки. Модель метода плавающей зоны учитывает следующие особенности данного метода: криволинейность свободной поверхности и фронтов кристаллизации (плавления), вращение, горизонтальные и вертикальные вибрации, термокапиллярную конвекцию и условия излучения на свободной поверхности. Форма плавающей зоны рассчитывалась из уравнения гидростатики для двухфазной среды жидкость – газ с учетом баланса сил давления, поверхностного натяжения и силы тяжести. Для определения границы раздела (формы плавающей зоны) использовался нестационарный VOF (Volume Of Fluid) метод повышенной точности. Фронт кристаллизации в данной модели задавался изотермой,

МЕТАСТАБИЛЬНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ

А.И. Федюшкин

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлунского РАН, Москва, Россия
fai@ipmnet.ru*

ВВЕДЕНИЕ.

Объемы жидкости со свободными поверхностями могут образовывать различные формы: равновесные, неравновесные, устойчивые, неустойчивые, в том числе метастабильные, а также стационарные и нестационарные. Метастабильное состояние физической системы – это состояние квазистабильного равновесия. Система в метастабильном состоянии может находиться длительное время при не очень больших возмущениях, в отличие от неустойчивого равновесия. Метастабильные состояния физических систем широко известны, и проявляются в разных физических процессах, например, при неравновесных фазовых переходах, как ликвация магмы и металлов; как гистерезисы при вязкоупругой деформации в магнитной и квантовой физике, в термодинамике и в других областях. Вид свободной поверхности зависит от условий окружающей среды и свойств жидкости [1]. Равновесное состояние жидкого объема соответствует минимуму потенциальной энергии, вследствие чего площадь свободной поверхности сокращается до минимально возможной под действием сил межмолекулярного взаимодействия [1, 2]. Силы поверхностного натяжения жидкости во взаимодействии с силами давления, вязкости создают энергетически выгодную форму жидкого объема. На форму жидкости, находящейся в ограниченном объеме, могут влиять: конвекция, соотношение объемов газа и жидкости, краевой угол смачивания [1-4]. В условиях невесомости влияние поверхностных сил на форму свободной поверхности обычно проявляется сильнее, чем в земных условиях и в этом конвекция Марангони может иметь доминирующую роль [1, 3]. Устойчивость тепловой и концентрационной конвекции Марангони и ее влияние на деформацию свободной поверхности показано во многих работах, например, в [4-7]. Конвекция Марангони может иметь пороговый эффект [3-5]. Причиной порогового эффекта могут быть: направления подводимых потоков тепла или (и) концентрации [3], реологические свойства жидкости [5], внешние условия и контактные свойства, если присутствуют твердые тела [1, 3]. Изучение поведения свободной поверхности в двухслойных жидких системах важно не только для фундаментальных исследований гидродинамики, но и для решения многих прикладных задач, например, для авиации и космонавтики, здравоохранения, химической промышленности, для технологий получения материалов и лекарств, и т.д.

В данной работе на основе численного моделирования показано что, положение границы раздела в двухслойной системе "воздух-вода" параллельное потоку тепла (массы) при наличии термокапиллярной (концентрационно-капиллярной) конвекции в невесомости является метастабильно неустойчивым. В земных условиях при наличии гравитационной конвекции горизонтальное положение свободной поверхности является устойчивым.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

Рассмотрена задача о влиянии внезапного нагрева двухслойной системы «воздух-вода» в квадратной полости с границами без трения (с проскальзыванием) на форму границы раздела при термокапиллярной конвекции без гравитационной конвекции (ускорение силы тяжести $g=0$), а также и с наличием гравитационной конвекции ($g \neq 0$).

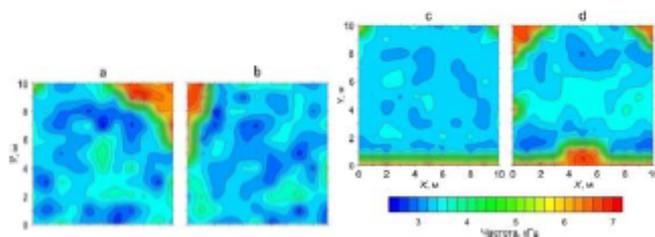


Рисунок 3. Распределение частоты нижней моды стоячих волн по поверхностям бетонных плит верхнего (а-б) и нижнего (с-д) рядов.

Таким образом, приведенные результаты показали, что метод стоячих волн позволяет надежно диагностировать изменения в грунтах основания бетонных плит крепления откосов дамб и плотин, в частности, выявлять образовавшиеся пустоты и участки разуплотненных грунтов.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0009 «Динамический анализ сейсмических данных для построения реалистичных моделей геологической среды на основе математического и физического моделирования». Полученные результаты показали, что записи акустических шумов можно с успехом использовать для диагностирования потери устойчивости участков надземных трубопроводов, вызванной снижением жесткости закрепления пролетов трубы.

Литература / References:

1. Юзбеков Н.С. Проблемы оценки состояния грунтовых плотин // Технологии гражданской безопасности. 2004. №2(6). С. 62–65.
2. Derobert X., Fauchard C., Côte P., Le Brusq E., Guillanton E., Dauvignac J.Y., Pichot C. Step-frequency radar applied on thin road layers // J. Appl. Geophys. 2001. V. 47. No. 3–4. pp. 317–325.
3. Khamzin A.K., Varnavina A.V., Torgashov E.V., Anderson N.L., Sneed L.H. Utilization of air-launched ground penetrating radar (GPR) for pavement condition assessment // Constr. Build. Mater. 2017. V. 141. pp. 130–139.
4. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Obnaruzheniye podzemnykh pustot po makroseysmam: fizicheskoye modelirovaniye // Tekhnologii seysmorazvedki. 2015. № 4. pp. 89–96.
5. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., Ngomayuyezve L. Diagnostika osnovaniya tverdogo dorozhnogo pokrytiya po uprugim stoyachim volnam // Inzhenerye izyskaniya. 2018. V. XII (7–8). pp. 84–91.
6. Kolesnikov Yu. I, Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment // Geophys. Prospect. 2018. V. 66. pp. 342–353.



ГИДРОДИНАМИКА КАПЛИ ВОДЫ ПРИ ЕЁ СТОЛКНОВЕНИИ С НЕБОЛЬШИМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

А.И. Федюшкин, А.Н. Рожков

Институт проблем механики им. А.Ю. Иткинского РАН, Москва, fai@ipmnet.ru, rozhkov@ipmnet.ru

Исследование растекания капель при падении на твердую поверхность имеет фундаментальное и прикладное научное значение для изучения закономерностей многофазной гидродинамики различных физических процессах, в частности, например, при исследовании распространения и защиты от вирусов, передаваемых воздушно-капельным путём с наличием инфицированных капель. Изучению динамики капель посвящено большое количество работ, обзоры работ, по исследованию гидродинамики при ударе и растекании капель, можно найти в работах [1–4]. В данной работе представлены экспериментальные данные и результаты численного моделирования гидродинамики капель воды при падении на небольшую твердую поверхность. Численное моделирование осуществлялось на основе решения 2D и 3D уравнений Навье-Стокса для двухфазных систем «воздух-вода», модель и численный метод описаны в работах [4, 5].

Простейший вариант столкновения – удар капли по небольшому диску (рис. 1). В результате удара формируется круглая жидкая плёнка (ламелла), ограниченная краевой струей (жидким тором), которая сначала расширяется, а затем схлопывается. Для случая на рис. 1 весь процесс занимает не более 6 мс. В данной работе уделено внимание трем этапам взаимодействия капли с твердой поверхностью: 1- начальная стадия (формированием струи и захват микропузырька), 2 – образование и растекание ламеллы, 3 – схлопывание ламеллы. Математическое моделирование проведено для разных диаметров капель от $d=0.5$ до $d=4$ мм, скоростей от $v_1=1$ м/с до $v_1=3.87$ м/с, свойств и углов смачивания, что соответствовало диапазонам числа Вебера $We_1=50-800$ и числа Рейнольдса $Re=70-2 \cdot 10^3$. Диаметр твердого препятствия (диска) был равен $d=2$ мм – для капель с диаметром $d_1 < 2$ мм и $d_1=4$ мм – для капель с диаметром $d_1 > 2$ мм.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные растекания капли воды ($v_1=3.87$ м/с, $d_1=2.67$ мм, $d_1=4$ мм),

to study directional unloading method for naturally fractured reservoirs on the results of physical modeling.

The reported study was funded by RFBR, project number № 20-05-00629.

Интература / References:

1. Barton C.A., Zoback M.D., Moos D. Identification of Hydraulically Conductive Fractures from the Analysis of Localized Stress Perturbations and Thermal Anomalies // In: Proc. Symp. Application Geophys. Eng. Envir. Probl. 1994. pp. 945-952.
2. Shen B., Stephansson O. Modification of the G-criterion for crack propagation subjected to compression // Eng. Fract. Mech. 1994. V. 47(2). pp. 177-189.
3. Dubinya N. An analytical solution for spatial orientations of critically stressed fracture problem and its application for transitional stress regimes // Proc. 54th US Rock Mech. / Geomech. Symp. 2020. pp. 1-9.
4. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Directional Unloading Method is a New Approach to Enhancing Oil and Gas Well Productivity. Geomechanics of Oil and Gas Wells // Adv. in Oil and Gas Exploration & Production. 2020. pp. 155-166.
5. Jaeger J.G., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of Rock Mechanics. Blackwell Publishers, 2007. 4th ed. 488 p.



THE MOVEMENT OF THE PARTICLES AROUND CYLINDRICAL PARTICLE IN A SHEAR FLOW

A.I. Fedyushkin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, fai@ipmmnet.ru

In the given work the problem about movement of particles around a cylindrical particle in a shear flow for weightlessness and normal Ground conditions is considered. Cases with densities of particles bigger and smaller of density of the basic buffer moving liquid (oil particles in water and water particles in oil) are presented. It is supposed that the quantity of particles is too little and they do not render influence on the basic flow.

Movement of particles with diameter d , around a cylindrical particle of diameter d , which located in the centre ($x = 0, y = 0$) of rectangular region $[-X < x < X, -Y < y < Y]$, with fluid flow along an axis x with a velocity $V(x, y) = \alpha y$ (Fig. 1) is considered. The vector of acceleration of gravity g is directed towards to an axis y .

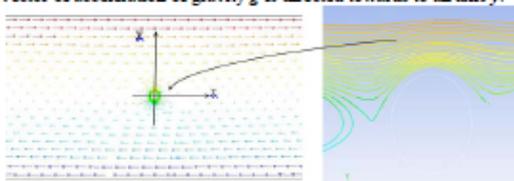


Figure 1. The scheme of simulation region, field of vector of velocity (at the left) and tracks of particles around a cylindrical particle which there is in the beginning of co-ordinates (on the right).

The particle in the centre of calculation region is simulated by not deformable cylindrical surface and rotatable on account of a shear flow. Cases of the task for surface shear stress equal to zero and tasks of a surface tension for water and oil are considered. The calculations have shown that velocity on a cylindrical surface coincides with angular speed $\omega = 1/2 \text{ rot}V$ (ω – a vector of angular rotation of an element of environment in a point).

Mathematical simulation is performed on the basis of numerical solutions of unsteady 2D Navier-Stokes equations for incompressible laminar fluid flow. A movement of the particles is calculated in Lagrangian variables. The friction and Saffman lift forces of interaction of the particles with a fluid flow were taken into account of model.

Initial distances of particles were $2d$ from the centre of region and they regular intervals located on a vertical on a range from $y = 0$ to $y = 0.5d$. Initial speeds of particles corresponded to velocities of environment in the given point.

In given paper results of simulation for following values of parameters: a diameter of particles $d = 0.0001$ m, $X = 0.0025$ m, $Y = 0.001$ m, $\alpha = 300 \text{ sec}^{-1}$ are presented.

Two variants of particles and a buffer liquids are considered with following properties:

- 1) drops of diesel oil (a density is 730 kg/m^3) in water (a density is 875 kg/m^3 , a viscosity is $0.000589 \text{ kg/m sec}$),
- 2) drops of water in diesel oil (a density is 730 kg/m^3 , a viscosity is 0.0024 kg/m sec).

The time dependences of position of ten particles (y co-ordinate) are shown in Fig.2.

Time dependences of distances of two oil running particles to a surface of the cylindrical particle from x coordinate are presented in Fig. 3. The given two oil particles (in Fig. 3) are chosen, as the coming most nearer to the cylindrical particle for the given series of calculations. The minimum distance of closeness with the cylindrical particle approximately is $0.07d$.

The results of numerical simulation have shown character of influence of gravity, viscosity, lift and drag forces on trajectories of a movement of water and oil particles in a shear flow.

Федюшкин А.И., Рожков А.Н., Критерий растекания/разбрызгивания капли при ударе о твердую мишень. Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Седьмая международная научная конференция-школа молодых ученых; 20-22 октября 2021 г., Материалы конференции, , 230-233, 2021. ISBN 978-5-91741-271-9.

сжатии песчаника // Доклады РАН. Физика, Технические науки. 2020. – Т. 495, № 1. С. 63–67.



КРИТЕРИЙ РАСТЕКАНИЯ/РАЗБРЫЗГИВАНИЯ КАПЛИ
ПРИ УДАРЕ О ТВЕРДУЮ МИШЕНЬ

А.И. Федюшкин, А.Н. Рожков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва,
fai@ipmnet.ru, rozhkov@ipmnet.ru

Данная работа посвящена исследованию деформации и фрагментации капель жидкости при их столкновении с масками и фильтрами, защищающими человека от зараженных капель воздуха. Дыхание, кашель и чихание вызывают выброс капель слюны и бронхиальной слизи, которые могут фрагментироваться. Многие вирусы, в том числе COVID-19, (размеры которых порядка 100-120нм) живут только в жидкой среде. Минимальные размеры капель, с носителями вирусов соизмеримы с размерами пор масок (порядка 0.1-10мкм), поэтому актуально исследовать гидродинамику и фрагментацию капель при прохождении через защитные маски, фильтры и одежду. В данной работе численно и экспериментально локальное столкновение капли с маской или фильтром моделируется ударом капли о небольшое препятствие. Исследование позволяет проследить фрагментацию ротовой и бронхиальной жидкостей и их превращение в количество мельчайших капель, распространяющих инфекцию в воздухе. Безразмерным определяющим параметром задачи растекания и фрагментации капли является число Вебера. Экспериментально и численно найден диапазон числа Вебера в котором находится критическое число Вебера We_c^* , при превышении которого капля при ударе о твердую мишень не просто растекается, а фрагментируется на более мелкие (разбрызгивается). В реальности, зараженные капли попадающие на маски и фильтры имеют числа Вебера близкие к We_c^* [1-5].

Характер растекания капли определяется соотношением и взаимодействием сил инерции, вязкости и поверхностного натяжения, а также углом смачивания поверхности (в расчетах угол смачивания был равен 90°). Задача характеризуется безразмерными числами Рейнольдса $Re = \rho v_i d_i / \mu$ и числом Вебера $We_i = \rho v_i^2 d_i / \sigma$, где ρ - плотность, v_i - скорость падения капли, d_i - диаметр капли, μ - вязкость, и σ - коэффициент поверхностного натяжения. Математическая модель основана на решении 2D и 3D уравнений Навье-Стокса методом контрольных объемов для двухфазных жидкостных систем «воздух-жидкость» с использованием VOF метода. Подробнее математическая модель и метод решения описаны в работах [6, 7]. Схема модели движения капли показана на рис. 1, а. При численном моделировании для капель воды свойства задавались следующие: $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ - плотность, $\mu = 10^{-3} \text{ кг/м сек}$, и $\sigma = 0.072 \text{ Н/м}^2$. На рис. 1, б представлены экспериментальные данные (слева) и результаты 3D моделирования (справа) растекания капли воды ($v_i=3.87 \text{ м/сек}$, $d_i=2.67 \text{ мм}$, $d_t=4 \text{ мм}$), показывающие формирование ламеллы с краевой струей и вторичными каплями в момент времени $t=1 \text{ мс}$.

Федюшкин А.И., Численное моделирование конвективных потоков воздуха в больших промышленных зданиях для анализа и оптимизации естественной вентиляции в них. Волны и вихри в сложных средах: 12-ая международная конференция – школа молодых ученых; 01 – 03 декабря 2021 г.. Сборник материалов школы, 225-228, 2021. ISBN 978-5-91741-260-3

16. Fedyushkin A. I. The effect of convection on the position of the free liquid surface under zero and terrestrial gravity // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1675. P. 012039. DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012039.
17. Федюшкин А. И. Метастабильная неустойчивость положения свободной поверхности жидкости в условиях невесомости // Волны и вихри в сложных средах: 11-ая международная конференция - школа молодых ученых, 1-3 декабря 2020 г., Москва: Сборник материалов школы. –М: ООО «ИСПО-принт», 2020. С. 186–189.



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В БОЛЬШИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЯХ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В НИХ

А.И. Федюшкин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

e-mail: fai@ipmnet.ru

Для поддержания необходимых санитарных температурных условий и удаления загрязненного воздуха во всех современных производственных помещениях используются системы вентиляции. Естественнo-конвективная вентиляция является наиболее экономичной и эффективной, особенно в случаях, когда температура внутри вентилируемого здания гораздо выше, чем снаружи корпуса. Такие условия часто существуют в производственных помещениях с большими тепловыделяющими установками, находящимися внутри здания, например, в литейных цехах, в корпусах электролиза алюминия и выращивания кристаллов, в котельных и в других. Для выполнения экологических норм и создания комфортных условий при работе людей в таких производственных корпусах часто возникает потребность в увеличении эффективности естественнo-конвективной вентиляции, не прибегая к принудительной вентиляции, то есть без дополнительных энергозатрат. Важнейшими факторами для эффективной естественной вентиляции промышленных зданий являются геометрия, форма и конструкция аэрационных фонарей. В данной работе представлены и проанализированы результаты математического моделирования, полученные на основе решения уравнений Рейнольдса для турбулентного течения воздуха. Анализ результатов численного моделирования вентиляции промышленных зданий с различными, наиболее часто используемыми, аэрационными фонарями [1, 2] показал, возможность проведения оценки эффективности естественнo-конвективной вентиляции промышленного корпуса и выбора оптимального типа аэрационного фонаря для существующего корпуса или при проектировании нового здания.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. В здании электролиза вследствие большого тепловыделения от электролизеров доминирующим конвективным течением воздуха будет подъемно-опускное движение с выходом воздуха через аэрационный фонарь и подсосом свежего воздуха снизу через специальные отверстия.

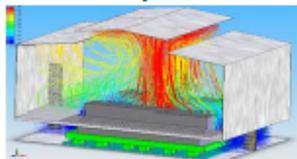


Рис. 1. 3D модель корпуса электролиза с фонарем «ВАМИ»

Структура основного конвективного течения воздуха в корпусе цеха электролиза алюминия имеет периодический характер по длине корпуса с периодом равным расстоянию между электролизерами. Поэтому в трехмерной математической модели в качестве расчетной области взят не весь корпус, а только часть корпуса с одним или двумя электролизерами и с периодическими граничными условиями для искомым функций на фронтальных и

7. *Kripfgans O.D., Orifici C., Carson P., Ives K., Eldevik O., Fowlkes J.* Acoustic droplet vaporization for temporal and spatial control of tissue occlusion: A kidney study // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr.* 2005. V. 52. P. 1101-1110.
8. *Rapoport N.* Phase-shift, stimuli-responsive perfluorocarbon nanodroplets for drug delivery to cancer // *WIREs Nanomed. Nanobiotechnol.* 2012. V. 4. P. 492-510.
9. *Sheeran P.S., Luo S.H., Mullin L.B., Matsumaga T.O., Dayton P.A.* Design of ultrasonically-activatable nanoparticles using low boiling point perfluorocarbons // *Biomaterials.* 2012. V. 33. P. 3262-3269.
10. *Doinikov A.A., Sheeran P.S., Bouakaz A., Dayton P.A.* Vaporization dynamics of volatile perfluorocarbon droplets: A theoretical model and in vitro validation // *Med. Phys.* 2014. V. 41. P. 102901.
11. *Park S., Son G.* Numerical investigation of acoustic vaporization threshold of microdroplets // *Ultrasonics Sonochemistry.* 2021. V. 71. P. 105361.
12. *Lacour T., Guedra M., Brasier T., Coullouvat F.* A model for acoustic vaporization dynamics of a bubble/droplet system encapsulated within a hyperelastic shell // *J. Acoust. Soc. Am.* 2018. V. 143. P. 23-37.
13. *Gubaidullin D.A., Gubaidullina D.D., Fedorov Yu.V.* The influence of heat transfer on the acoustics of a liquid with encapsulated bubbles // *Lobachevski Journal of Mathematics.* 2020. V. 41. № 7. P. 1202-1205.
14. *Губайдуллин Д. А., Федоров Ю. В.* Волновая динамика покрытых оболочкой включений в вязкоупругой среде // *ПМТФ.* 2020. Т. 61. № 4. С. 22-30.
15. *Gubaidullin D. A., Fedorov Yu. V.* Acoustics of a viscoelastic medium with encapsulated bubbles // *Journal of Hydrodynamics.* 2021. V. 33. № 1. P. 55-62.



ТЕМПЕРАТУРНОЕ И КОНЦЕНТРАЦИОННОЕ РАССЛОЕНИЯ ЖИДКОСТИ, ВЫЗВАННЫЕ КОНВЕКТИВНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ

А.И. Федюшкин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

e-mail: fai@ipmnet.ru

Для ряда процессов с конвективным перемешиванием жидкостей важным аспектом является возникновение температурного или концентрационного расслоения в объёме жидкости. Для разных приложений такое расслоение может иметь, как позитивное, так и негативное значения. Такие процессы тепломассообмена могут иметь место, как в земных условиях, так и в условиях микрогравитации [1], например, это задачи хранения жидкого ракетного топлива в баках; процессы получения однородных материалов из расплавов и растворов; очистка воздуха в помещениях от загрязнений, задымлений, а также от мелкодисперсных жидких включений, зараженных вирусами, в частности, от COVID-19.

В данной работе приводятся результаты численного моделирования конвективных течений и обсуждаются нелинейные особенности тепломассопереноса, приводящие к температурному и концентрационному расслоению. Представленные в данной работе результаты получены на основе численных решений полных уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска. В работе также представлены сравнения численных и экспериментальных данных.

Одним из примеров проявления нелинейности ламинарных течений является немонотонная закономерность зависимости температурного или концентрационного рас-

зырьков $\alpha = 0,02$. Расчеты проведены по математической модели [8, 9]. На рис. 1 представлено влияние оболочки пузырьков и упругости несущей фазы (толщина вязкоупругой оболочки $r_s = 1,6 \cdot 10^{-5}$ м, жидкий слой отсутствует $r_e = 0$) на зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания от частоты возмущений. Для вязкоупругой среды с воздушными пузырьками дано сравнение теории с экспериментальными данными [7] (кривая 2). Как видно из рисунка, учет модуля сдвига несущей фазы приводит к увеличению резонансной частоты возмущений, что также хорошо подтверждается экспериментальными данными.

Учет вязкоупругой оболочки приводит к еще большему значению резонансной частоты (кривая 3). Наличие оболочки пузырьков может привести также к исчезновению полосы непрозрачности у фазовой скорости (фазовая скорость не превышает скорости звука в несущей фазе во всем диапазоне частот) и уменьшению максимального значения коэффициента затухания. Это связано с тем, что оболочка пузырьков сдерживает пульсации включений. Пузырьки ведут себя как упругие частицы и, в связи с этим, происходит меньшее рассеяние акустической волны по сравнению с обычными пузырьковыми средами.

1. *Ultrasound Contrast Agents. Basic Principles and Clinical Applications* / Ed. by B. B. Goldberg, J. S. Raichlen, F. Forsberg. — Martin Dunitz, 2001.
2. *Sboros V.* Response of contrast agents to ultrasound // *Advanced Drug Delivery Reviews*. — 2008. — V. 60. — P. 1117–1136.
3. *Kripfgans O. D., Fowlkes J. B., Miller D. L., Eldevik O. P., Carson P. L.* Acoustic droplet vaporization for therapeutic and diagnostic applications // *Ultrasound Med. Biol.* — 2000. — V. 26. — P. 1177–1189.
4. *Bull J. L.* The application of microbubbles for targeted drug delivery // *Expert. Opin. Drug Deliv.* — 2007. — V. 4. — P. 475–493.
5. *Bull J. L.* Cardiovascular bubble dynamics // *Critical Reviews in Biomedical Engineering*. — 2005. — V. 33. — P. 299–346.
6. *Qamar A., Wong Z. Z., Fowlkes J. B., Bull J. L.* Dynamics of acoustic droplet vaporization in gas embolotherapy // *Applied Physics Letters*. — 2010. — V. 96. — P. 143702.
7. *Leroy V., Strybulevich A., Page J. H., Scanlon M. G.* Influence of positional correlations on the propagation of waves in a complex medium with polydisperse resonant scatterers // *Physical Review E*. — 2011. — V. 83. — P. 046605.
8. *Губайдуллин Д. А., Федоров Ю. В.* Волновая динамика покрытых оболочкой включений в вязкоупругой среде // *Прикладная механика и техническая физика*. — 2020. — Т. 61, №4. — С. 22–30.
9. *Gubaidullin D. A., Fedorov Yu. V.* Acoustics of a viscoelastic medium with encapsulated bubbles // *Journal of Hydrodynamics*. — 2021. — V. 33, No. 1. — P. 55–62.

ОБТЕКАНИЕ КАПЛЕЙ ВОДЫ ТОНКОЙ НИТИ*

А. И. Федюшкин, А. А. Захаров, А. Н. Рожков

ИПМех РАН, Москва, Россия

В работе представлены результаты численного моделирования обтекания тонкой нити каплей воды в движущейся воздушной среде при разных начальных скоростях капли. Показано влияние скорости капли на положение и формы капли, на режимы обтекания и задержание капли нитью.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы по теме АААА-А20-120011690131-7 и гранта РФФИ №20-04-60128 Вирусы.

Федюшкин А.И., Рожков А.Н., Режимы обтекания капель тонкой нити. Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Седьмая международная научная конференция-школа молодых ученых; 20-22 октября 2021 г., Материалы конференции, ISBN 978-5-91741-271-9, 233-236, 2021. ISBN 978-5-91741-271-9.

impact with a solid target (numerical simulation and experiment). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: in print.

6. Федюшкин А. И., Рожков А. Н. 2020. Моделирование коалесценции капель. Математическое моделирование и численные методы. 26, 2: 46–58.

7. Feduyshkin A. I., Rozhkov A. N. A. 2020. Coalescence of the droplets. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 927: 012055.



РЕЖИМЫ ОБТЕКАНИЯ КАПЛЕЙ ТОНКОЙ НИТИ

А.И. Федюшкин, А.Н. Рожков

Институт проблем механики им. А.Ю. Иткинского РАН, Москва,
fat@ipmnet.ru, rozhkov@ipmnet.ru

В работе представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования поперечного обтекания тонкой нити жидкой каплей, движущейся в воздушной среде. Рассмотрены случаи для разных свойств капель и разных скоростей капель. Показано существование разных режимов обтекания капель нити: отскок, удержание, прохождение с разделением на части, с их последующим сливанием (коалесценцией) и без сливания.

Введение. В связи с защитой людей от инфекционных заболеваний, передающихся воздушно-капельным путём, в том числе от вируса COVID-19, стоит задача исследования проникновения капель жидкости через защитные маски. Вирус живет в питательной жидкой среде малого объема, поэтому данная работа посвящена изучению обтекания и задержания жидкой капли отдельной тонкой нитью. Экспериментально данная задача изучается в работе [1], где в столкновении с нитью участвуют капли не только ньютоновских жидкостей, как в работе [2], но и капли упруговязких жидкостей водных растворов полиакриламида, реология которых соответствует реальным ротовым и бронхиальным жидкостям [3]. Гидродинамика растекания капель данных жидкостей при ударе о твердую поверхность изучалась в работе [4]. Данная работа является продолжением исследований гидродинамики капель при их коалесценции и ударах о твердую поверхность [1, 4-9].

Постановка задачи. Рассмотрены ньютоновские и упруговязкие жидкости, реология которых соответствует реальным ротовым и бронхиальным жидкостям [1]. В экспериментах капля жидкости формировалась на конце капилляра, функцию которого выполняла инъекционная игла диаметром $d_i=0.8$ мм. Жидкость медленно наполняла каплю при помощи инфузионного насоса и при достижении определенного веса капля отрывалась от капилляра [3]. Далее она сталкивалась с поперечно расположенным цилиндрическим препятствием. Препятствием служила другая игла диаметром $d_p=0.4$ или 0.8 мм. Для повышения контрастности и удаления из поля съёмки посторонних объектов игла была согнута примерно под прямым углом, так что на кадрах видны только капля и торец иглы (рис. 1). В опытах расстояние от среза верхней иглы до боковой поверхности нижней составляло $h_p=5, 10$ и 20 мм. Процесс столкновения регистрировался при помощи видеокамеры. Обработка видеоклипов позволяла определить диаметр $d_p \approx 3$ мм и оценить скорость $v_p \approx 0.2-0.5$ м/с капли перед контактом с препятствием, а также проследить все фазы столкновения, некоторые из которых представлены на рис. 1.

Гневушев А.А., Пунтус А.А., Федюшкин А.И., Влияние управляемых вибраций на конвективное течение в горизонтальном слое при подогреве снизу. Материалы XXII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (ВМСППС'2021), 4–13 сентября 2021 г., Алушта. — М.: МАИ, 342-344, 2021. ISBN 978-5-4316-0824-7



При данной скорости потока, рассчитанные температуры за головной УВ и при достижении термодинамического равновесия в ДВ равны.

1. Черный Г.Г. Газовая динамика. — М.: Наука, 1988. — 424 с.
2. Гадастов В.Ю., Кононов Д.С. Численное моделирование сгорания топлива в стационарной детонационной волне в канале переменного сечения со сверхзвуковым потоком на входе и выходе // Труды МАИ. — 2019. — №109.
3. Гадастов В.Ю. Вычислительный алгоритм решения задачи о распаде произвольного разрыва в равновесно-реагирующем газе // Математическое моделирование. — 2006. — Т. 18, №8. — С. 64–76.
4. Гадастов В.Ю. Численное моделирование одномерного стационарного равновесного течения в детонационном двигателе // Труды МАИ. — 2015. — №83.
5. Гадастов В.Ю., Северина Н.С. Элементарные модели и вычислительные алгоритмы физической газовой динамики. Ударные и детонационные волны: Учеб. пособ. — М.: Факториал, 2016. — 84 с.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание в 4-х т. // Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. — М.: Наука, 1982.

ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ВИБРАЦИЙ НА КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ПРИ ПОДОГРЕВЕ СНИЗУ*

А. А. Гневушев^{1,2}, А. А. Пунтус¹, А. И. Федюшкин²

¹МАИ, Москва, Россия; ²ИПМех РАН, Москва, Россия

В работе представлены результаты численного моделирования конвективного теплообмена в длинном горизонтальном слое при подогреве снизу. Показано влияние вибраций нижней нагреваемой стенки на время и на критическое число Рэлея возникновения конвекции.

Введение. Началом изучения конвективного движения можно считать эксперименты Бенара [1], наблюдавшего возникновение пространственно-периодической конвекции в подогреваемом снизу горизонтальном слое жидкости (так называемые ячейки Бенара). Возникновение конвекции при подогреве слоя жидкости снизу имеет пороговый характер. Рэлей теоретически исследовал устойчивость равновесия в горизонтальном слое и определил критические значения параметров возникновения конвекции для слоя с обеими свободными границами [2]. Устойчивость конвекции в горизонтальных слоях подробно исследована в книге [3]. В работе [4] приведены результаты тепловой, гравитационной и термокапиллярной конвекции в условиях пониженной гравитации. Наличие свободной границы приводит к повышению порога неустойчивости системы. Учет деформации свободной поверхности приводит к возникновению в системе колебательных возмущений и может иметь метастабильный характер [5] с существенным изменением формы и положения свободной поверхности жидкости. В работе [6] приводится анализ формирования пространственных режимов конвективных структур, смены их масштабов и форм.

Данная работа является продолжением исследований влияния управляемых вибраций на конвективные течения [7–9].

Постановка задачи. Исследуемая проблема о тепловой конвекции вязкой несжимаемой жидкости рассматривается в замкнутой области в поле тяжести

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы по теме АААА-А20-120011690131-7 и гранта РФФИ №20-04-60128.

Федюшкин А.И., Метастабильная неустойчивость конвекции Марангони. Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 7–9 декабря 2020 г, 1127-1131, 2021. ISBN 978-5-6045486-1-5

УДК 532.613.5
ББК 22.265-22.145

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Актуальные проблемы
прикладной математики,
информатики и механики

Сборник трудов
Международной научной конференции

Воронеж,
7–9 декабря 2020 г.

Воронеж
Издательство
«Научно-исследовательские публикации»
2021

Председатель организационного комитета
Пашенов А. И. – д.р.физ.-мат. наук, профессор, доцент факультета прикладной математики,
информатики и механики Воронежского государственного университета
Заместители председателя организационного комитета
Медведев С. И. – канд. физ.-мат. наук, доцент (Воронеж)
Кривошапко А. В. – д.р.физ.-мат. наук, доцент (Воронеж)

Члены организационного комитета:
Г. В. Абрамов, д.р.техн. наук, проф.; Т. В. Андреева, д.р.техн. наук, проф.; А. А. Артемьев, д.р.техн. наук, проф.
(Тамбов); М. А. Артемьев, д.р.физ.-мат. наук, проф.; И. М. Агасева, канд. физ.-мат. наук, доц.;
М. Ш. Бурдуков, д.р.физ.-мат. наук, доц.; Н. С. Смирновский, д.р.физ.-мат. наук, проф.; Н. А. Казанков, канд.
физ.-мат. наук, доц.; И. П. Калашников, д.р.техн. наук, доц.; С. В. Козлов, канд. техн. наук, доц.; А. В. Колосов,
д.р.физ.-мат. наук, проф.; Т. М. Леденев, д.р.техн. наук, проф.; Л. Н. Лисица, д.р.физ.-мат. наук, проф.;
М. Г. Матвеев, д.р.техн. наук, проф.; О. А. Мещеряков, канд. физ.-мат. наук, доц.; Ю. Е. Ткаченко,
д.р.физ.-мат. наук, проф.; Э. Н. Шаников, д.р.физ.-мат. наук, доц.

Председатель программного комитета
Пашенов А. И. – д.р.физ.-мат. наук, профессор, доцент факультета прикладной математики,
информатики и механики Воронежского государственного университета
Заместители председателя программного комитета
Igor Bakker – prof. Dr. Dtsch., (Германия)
В. В. Васильев – д.р.физ.-мат. наук, проф., член-корр. РАН (Москва)

Члены программного комитета:
Semyon Levitsky, д.р.физ.-мат. наук, проф. (Израиль); Lopez Teófilo Masello, PhD, prof. (Куба);
А. А. Буренин, д.р.физ.-мат. наук, проф., член-корр. РАН (Санкт-Петербург); Ю. П. Вершинин, д.р.физ.-мат.
наук, проф. (Санкт-Петербург); В. М. Ивашкин, д.р.физ.-мат. наук, проф., академик РАН (Воронеж); Ильяса Мамадали,
д.р.физ.-мат. наук, проф. (Азербайджан); В. А. Колосов, д.р.физ.-мат. наук, проф. (Москва);
В. В. Кривошапко, канд. физ.-мат. наук, проф. (Москва); Г. И. Марченко, канд. техн. наук, проф. (Армения);
А. А. Маркин, д.р.физ.-мат. наук, проф. (Турция); Н. М. Матвеев, д.р.физ.-мат. наук, проф. (Турция);
И. М. Мещеряков, д.р.физ.-мат. наук, проф. (Азербайджан); Е. В. Мещеряков, д.р.физ.-мат. наук, проф., академик
РАН (Москва); И. А. Петров, д.р.физ.-мат. наук, проф. (Санкт-Петербург); С. Л. Шадринский, д.р.техн. наук,
проф. засл. раб. высш. школы РФ (Воронеж); Ю. Н. Ракин, д.р.физ.-мат. наук, проф. (Москва); В. П. Рапопорт,
д.р.физ.-мат. наук, проф. (Камерун); А. В. Родченко, д.р.физ.-мат. наук, проф., засл. доцент науки РФ
(Санкт-Петербург); А. А. Сагитов, д.р.техн. наук, проф. (Воронеж); С. М. Сеткин, д.р.физ.-мат. наук, доц. (Санкт-Петербург);
А. П. Смирнов, д.р.физ.-мат. наук, проф., засл. доцент науки РФ (Воронеж); А. В. Чапуров, д.р.физ.-мат. наук,
проф. (Мальдивские острова); А. В. Яковлев, д.р.физ.-мат. наук, проф., засл. раб. высш. школы РФ (Турция)

Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Между-
народной научной конференции. Воронеж, 7–9 декабря 2020 г. – Воронеж : Издательство «Научно-иссле-
довательские публикации», 2021. – 1805 с.

ISBN 978-5-60454-1-5
В сборнике представлены научные работы, доклады и лекции, представленные на Международной конфе-
ренции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», проходившей Воронежском
государственном университете.

Сборник предназначен для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов.

УДК 532.613.5
ББК 22.265-22.145
© ФГБОУ ВО ВГУ, 2021
© ООО «Издательство», 2021

УДК 532.613.5

МЕТАСТАБИЛЬНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КОНВЕКЦИИ МАРАНГОНИ

А. И. Федюшкин

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлывского РАН, Москва

Аннотация. В данной работе на основе численного моделирования показано влияние термокапиллярной и гравитационной конвекций на деформацию и положение границы раздела в двухслойной системе «воздух-вода» при нестационарном боковом нагреве. Показано, что равновесное положение границы раздела в двухслойной системе «воздух-вода» параллельное потоку тепла (массы) при наличии термокапиллярной (концентрационно-капиллярной) конвекции в несомосности является метастабильным. Гравитационная конвекция (даже при наличии термо-капиллярной конвекции) обладает стабилизирующим фактором для горизонтального положения свободной границы.
Ключевые слова: свободная поверхность, метастабильность, конвекция Марангони.

Введение

Объемы жидкости со свободными поверхностями могут образовывать различные формы: равновесные, неравновесные, устойчивые, неустойчивые, в том числе метастабильные, а также состояния свободных поверхностей могут быть стационарными и нестационарными. Метастабильное состояние физической системы — это состояние квазистойчивого равновесия. Система в метастабильном состоянии может находиться длительное время при не очень больших возмущениях, в отличие от неустойчивого равновесия. И в отличие от устойчивого состояния равновесия механической системы, метастабильное равновесие может терять устойчивость при определенных конечных (не малых) возмущениях. Метастабильные состояния физических систем широко известны, и проявляются в разных физических процессах, например, при неравновесных фазовых переходах, как ликвидация магмы и металлов; как гистерезисы при вязкоупругой деформации материалов, в магнитной и квантовой физике, в термодинамике и в других областях.

Конвекция, а том числе и конвекция Марангони, стремится выровнять и минимизировать энергетический потенциал жидкостной системы. Конвективные течения могут влиять на положение свободной поверхности. Форма свободной поверхности зависит от условий окружающей среды и свойств жидкости [1]. Равновесное состояние жидкого объема соответствует минимуму потенциальной энергии, вследствие чего площадь свободной поверхности сокращается до минимально возможной под действием сил межмолекулярного взаимодействия [1, 2]. Силы поверхностного натяжения жидкости во взаимодействии с силами давления, вязкости создают энергетически выгодную форму жидкого объема. На форму жидкости, находящейся в ограниченном объеме, могут влиять: конвекция, размеры и соотношение объемов газа и жидкости, краевой угол смачивания [1–4]. В условиях несомосности влияние поверхностных сил на форму свободной поверхности обычно проявляется сильнее, чем в земных условиях и в этом случае конвекция Марангони может играть доминирующую роль [1, 3]. Устойчивость тепловой и концентрационной конвекции Марангони и ее влияние на деформацию свободной поверхности показано во многих работах, например, в [4–7]. Конвекция Марангони может иметь пороговый эффект [3–5]. Причинами порогового эффекта изменения конвекции Марангони могут быть различные условия, например, направления подводящих потоков тепла или (и) концентрации [3], реологические свойства жидкости [5], внешние условия (гравитационные, электромагнитные поля), а также условия смачиваемости, если присутствуют кон-

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Актуальные проблемы
прикладной математики,
информатики и механики**

*Сборник трудов
Международной научной конференции*

Воронеж,
7–9 декабря 2020 г.

Воронеж
Издательство
«Научно-исследовательские публикации»
2021

УДК 531(063)+51-7(063)
ББК 22.245+22.145
А43

Председатель организационного комитета
Шапкин А. И. – д-р физ.-мат. наук, профессор, доцент факультета прикладной математики,
информатики и механики Воронежского государственного университета

Заместители председателя организационного комитета
Мельникова С. П. – канд. физ.-мат. наук, доцент (Воронеж)
Крутиченко А. В. – д-р физ.-мат. наук, доцент (Воронеж)

Члены организационного комитета:
Г. В. Абрамов, д-р техн. наук, проф.; Т. В. Андреева, д-р техн. наук, проф.; А. А. Арзамасцев, д-р техн. наук, проф.
(Тамбов); М. А. Артемьев, д-р физ.-мат. наук, проф.; Е. М. Архипова, канд. физ.-мат. наук, доц.;
М. Ш. Бурдуков, д-р физ.-мат. наук, доц.; П. С. Захаровский, д-р физ.-мат. наук, проф.; Н. А. Калитина, канд.
физ.-мат. наук, доц.; И. П. Казарин, д-р техн. наук, доц.; С. П. Козлов, канд. техн. наук, доц.; А. В. Козлов,
д-р физ.-мат. наук, проф.; Т. М. Леденко, д-р техн. наук, проф.; Л. Н. Пилип, д-р физ.-мат. наук, проф.;
М. Г. Матвеев, д-р техн. наук, проф.; О. А. Медведева, канд. физ.-мат. наук, доц.; Ю. К. Тимошенко,
д-р физ.-мат. наук, проф.; Э. П. Шапкин, д-р физ.-мат. наук, доц.

Председатель программного комитета
Шапкин А. И. – д-р физ.-мат. наук, профессор, доцент факультета прикладной математики,
информатики и механики Воронежского государственного университета

Заместители председателя программного комитета
Igor Vesjak – prof. Dr. Techn., (Германия)
В. В. Виноградов – д-р физ.-мат. наук, проф., член-корр. РАН (Москва)

Члены программного комитета:
Semyon Levitavsky, д-р физ.-мат. наук, проф. (Израиль); Igor Mascal, Ph.D, prof. (Колумбия);
А. А. Бурунов, д-р физ.-мат. наук, проф., член-корр. РАН (Комсомольск на Амуре); Ю. П. Черненко, д-р физ.-мат.
наук, проф. (Владивосток); В. П. Герасим, д-р техн. наук, проф. (Новосибирск); А. П. Жилин, д-р физ.-мат. наук,
проф. (Санкт-Петербург); В. М. Исаев, д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН (Воронеж); Илья Мамалов,
д-р физ.-мат. наук, профессор, академик АН РТ (Таджикистан); В. А. Козлов, д-р физ.-мат. наук, проф. (Москва);
В. В. Кривичев, канд. физ.-мат. наук, проф. (Москва); Г. И. Маргаров, канд. техн. наук, проф. (Армения);
А. А. Маркин, д-р физ.-мат. наук, проф. (Турция); Н. М. Матвеев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Турция);
В. М. Меркулов, д-р физ.-мат. наук, проф. (Азербайджан); Е. И. Мельникова, д-р физ.-мат. наук, проф., академик
РАН (Москва); Л. А. Петрова, д-р физ.-мат. наук, проф. (Санкт-Петербург); С. П. Подольный, д-р техн. наук,
проф. засл. раб. высш. школы РФ (Воронеж); Ю. Н. Радван, д-р физ.-мат. наук, проф. (Москва); В. П. Радошнев,
д-р физ.-мат. наук, проф. (Словения); А. Ф. Рахмонов, д-р физ.-мат. наук, проф., засл. деятель науки РФ
(Новосибирск); А. А. Сергеев, д-р техн. наук, проф. (Воронеж); С. М. Ситкин, д-р физ.-мат. наук, доц. (Владивосток);
А. Н. Спиринкин, д-р физ.-мат. наук, проф., засл. деятель науки РФ (Воронеж); А. В. Чагаров, д-р физ.-мат. наук,
проф. (Минск, Белоруссия); А. В. Яковлев, д-р физ.-мат. наук, проф., засл. раб. высш. школы РФ (Татарь).

Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Между-
народной научной конференции, Воронеж, 7–9 декабря 2020 г. – Воронеж : Издательство «Научно-исследо-
вательские публикации», 2021. – 1855 с.

ISBN 978-5-6045486-1-5

В сборнике представлены научные работы, доклады и лекции, представленные на Международной конфе-
ренции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», проводимой Воронежским
государственным университетом.

Сборник предназначен для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов.



9 785604 548615

УДК 531(063)+51-7(063)
ББК 22.245+22.145

© ФГБОУ ВО ВГУ, 2021
© ООО «Издательство», 2021

UDC 532.582.7

MOVEMENT OF LIQUID DROPLETS IN A SHEAR FLOW

A. I. Fedyushkin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow

Annotation. The problem of particle motion around a particle in a shear flow is considered for conditions of weightlessness and normal earth gravity. Cases with particle densities greater or less than the density of the main buffer moving fluid (oil particles in water and water particles in oil) are presented. Based on numerical modeling, the nature of the influence of gravitational, viscous, lifting, and drag forces on the trajectory of liquid particles in a shear fluid flow is shown. The minimum distance between liquid small drops and a streamlined drop is shown.
Ключевые слова: numerical simulation, motion of liquid particles, shear flow, particle closest approach.

In the given work the problem about movement of particles around a cylindrical particle in a shear flow for weightlessness and normal Ground conditions is considered. Cases with densities of particles bigger and smaller of density of the basic buffer moving liquid (oil particles in water and water particles in oil) are presented. It is supposed that the quantity of particles is too little and they do not render influence on the basic flow.

Movement of particles with diameter d , around a cylindrical particle of diameter d , which located in the centre ($x = 0, y = 0$) of rectangular region $[-X < x < X, -Y < y < Y]$, with fluid flow along an axis x with a velocity $V(x, y) = ay$ (Fig. 1) is considered. The vector of acceleration of gravity g is directed towards to an axis y .

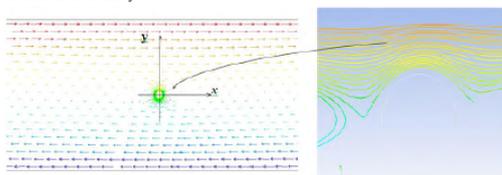


Fig. 1. The scheme of simulation region, field of vector of velocity (at the left) and tracks of particles around a cylindrical particle which there is in the beginning of co-ordinates (on the right)

The particle in the centre of calculation region is simulated by not deformable cylindrical surface and rotatable on account of a shear flow. Cases of the task for surface shear stress equal to zero and tasks of a surface tension for water and oil are considered. The calculations have shown that velocity on a cylindrical surface coincides with angular speed $\omega = 1/2rotV$ (ω – a vector of angular rotation of an element of environment in a point).

Mathematical simulation is performed on the basic of numerical solutions of unsteady 2D Navier-Stokes equations for incompressible laminar fluid flow. A movement of the particles is calculated in Lagrangian variables.

The friction and Saffman lift forces of interaction of the particles with a fluid flow were taken into account of model.

Пунтус А.А., Федюшкин А.И., О методе вычислительной гидродинамики как численном методе решения прикладных задач механики. Материалы XXII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (ВМСППС'2021), 4–13 сентября 2021 г., Алушта. — М.: МАИ, 437-439, 2021. ISBN 978-5-4316-0824-7.



4. Козлов В. В. Отрыв потока. — URL: <https://vihrestruktura.3dn.ru/publ/2-1-0-6>.
5. Prozorgoа E. The influence of the no symmetric stress tensor on the flow separation // Weasas Transaction on Applied and Theoretical Mechanics. — 2020. — V. 15, Art. 9. — P. 60–68. — DOI: 10.37394/232011.2020.15.
6. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 1, 2. — М.: Янус, 2019.
7. Ахиезер А. И., Пелетминский С. В. Методы статистической физики. — М.: Наука, 1977. — 368 с.
8. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. Т. 2. — М.: Мир, 1978. — 400 с.

О МЕТОДЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ КАК ЧИСЛЕННОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ

А. А. Пунтус¹, А. И. Федюшкин²

¹МАИ, Москва, Россия; ²ИПМех РАН, Москва, Россия

Содержанием доклада является накопленный авторами многолетний опыт практического приложения в научно-исследовательских работах студентов методов преподаваемых учебных курсов в Институте «Информационные технологии и прикладная математика» в МАИ. В содержание данного опыта входит не только использование качественного овладения студентами материала изучаемых курсов и закрепления его на соответствующих занятиях, но и последующее применение полученных знаний в студенческих научно-исследовательских работах в области практических приложений современных методов математического моделирования. Таким образом, достаточно успешная реализация изученных и усвоенных знаний студентами материала курсов учебных дисциплин достигается при соответствующем руководстве студентами в их научных исследованиях как авторами, так и его коллегами следующими путями, а именно это: использование современных методов преподавания практических приложений соответствующих дисциплин, привлечение наиболее продвинутых студентов к активной научно-исследовательской работе и, наконец, оправдавшая себя такая эффективная форма, как привлечение студентов при этом к овладению современными компьютерными технологиями, такими как CDF (Computational Fluid Dynamics) — моделирование, что является важным инструментом для решения и исследования задач аэро-гидродинамики и тепломассообмена.

Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics — CFD) является важным инструментом для решения и исследования задач аэро-гидродинамики и тепломассообмена, которые могут быть использованы студентами при выполнении как текущих учебных заданий, так и при выполнении самостоятельной научно-исследовательской работы. Практическое использование CFD в последние двадцать лет вошло в практику как в связи с активным развитием вычислительной техники, так и появлением новых достаточно эффективных численных математических методов [1, 6–8]. Внедрение в широкую практику данных методов позволило решать и новые практические задачи. Тем самым необходимость проведения фундаментальных научных исследований и потребность решения широкого диапазона прикладных задач, в частности в области прикладной гидродинамики, повысила актуальность подготовки высококвалифицированных CFD-специалистов.