



Теоретическое и экспериментальное исследование течений с испарением на термокапиллярной границе раздела: особенности моделирования, анализ характеристик¹

Бекежанова В.Б.^{*}, Гончарова О.Н.^{**}, Люлин Ю.В.^{***}

^{*}Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

^{**}Алтайский государственный университет, Барнаул

^{***}НИУ «Московский энергетический институт», Москва

Экспериментальные и теоретические исследования

Изучение конвекции в жидкостях с учётом испарения на межфазной поверхности относится к актуальным направлениям исследований, затрагивающим проблемы теплофизики и гидродинамики. Характер конвективных течений, развивающихся в слое жидкости под действием граничного теплового режима и испарения, вызываемого спутным потоком газа, оказывает прямое влияние на структуру самих течений, на величину массовой скорости испарения и характеристики теплопереноса и паросодержания в газе. Для получения полной картины течений в слое жидкости необходимо проводить совместные эксперименталь-

ные и теоретические исследования. Разработанные экспериментальные методы, включающие в себя стенд, оптические методики и инфракрасную съёмку, позволяют контролировать массовый расход газа, температуру рабочих сред, поддерживать плоскую форму границы раздела жидкости и газа и измерять температуру на поверхности и массовый расход парогазовой смеси на выходе рабочего участка. Для рабочей системы «этанол–воздух» при толщине слоя 3 мм проведены термографические исследования поверхности слоя жидкости, испаряющейся под действием потока газа. Получены новые экспериментальные данные массовой скорости испарения с межфазной поверхности в широком диапазоне скоростей потока газа 0.00139–1.38 м/с (Рис. 1), которые используются для верификации развиваемых аналитических методов исследования конвекции в условиях диффузионного испарения.

Теоретическое исследование испарительной конвекции включает разработку математических моделей для описания течений с учётом массопереноса через границу раздела жидкость–газ, изу-

¹Работа выполнена при поддержке РНФ (код проекта 22-11-00243, <https://rscf.ru/project/22-11-00243/>).

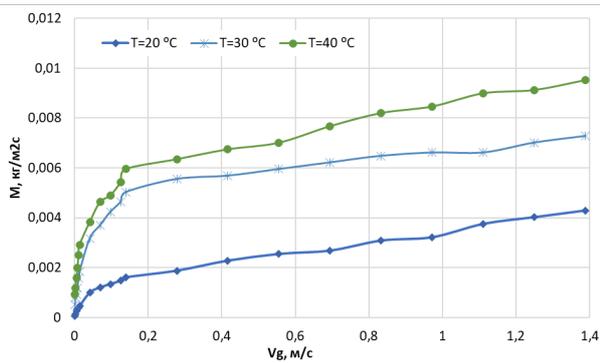


Рис. 1. Экспериментальные зависимости массовой скорости испарения M от рабочей температуры T в системе «этанол – воздух» и скорости потока газа V_g при толщине слоя жидкости 3 м

чение корректности сформулированных начально-краевых задач и построение точных решений, исследование вопросов устойчивости течений, описываемых точными решениями, определение области применимости данных решений и математической модели в целом, проведение сравнения с экспериментальными данными [1]. Для исследования процессов конвективного теплообмена в двухфазных системах используется подход, основанный на применении приближения Обербека–Буссинеска уравнений Навье–Стокса. При этом в определяющих уравнениях и граничных соотношениях дополнительно учитывается вклад явлений термодиффузии и диффузионной теплопроводности, имеющих место в парогазовом слое за счёт присутствия испаряемого компонента.

Среди точных решений уравнений конвекции, имеющих групповую природу, выделяются решения типа решений Остроумова–Бириха, которые могут быть эффективно использованы для описания течений в условиях фазовых превращений жидкость–пар. Аналитическое и численное исследование двухфазных течений с испарением или конденсацией на поверхности раздела, проведенное на основе обобщений решений Остроумова–Бириха, позволяют описать режимы испарительной конвекции, наблюдаемые в реальных физических системах, что подтверждается хорошим качественным и количественным согласованием экспериментальных данных и теоретических результатов. Построенные решения позволяют изучить фундаментальные и вторичные особенности моделируемых физических процессов и представить анализ влияния геометрических и теплофизических характеристик рабочей системы на характер течений [2–4].

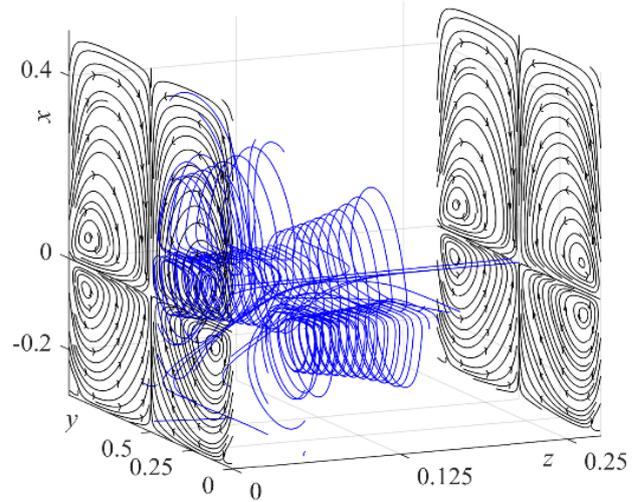


Рис. 2. Примеры распределений характеристик в системе сред «этанол–азот»: поле скорости и траектории жидких частиц

Особенности трёхмерных решений

Точное решение в трёхмерном случае является частично-инвариантным решением ранга 2 дефекта 3 определяющих уравнений и качественно описывает стационарные совместные течения жидкости и парогазовой смеси в бесконечном канале прямоугольного сечения. На основе решения определяются характеристики конвективных течений на рабочем участке протяженного канала, описываются различные формы реализации поступательно-вращательных течений, включая формирование валиковой конвекции, приповерхностных горячих слоев и термических валов, специфических тепловых структур с дефектами, а также холодного термоклина в объёмной жидкой фазе. На Рис. 2–5 представлен пример структуры течения, устано-

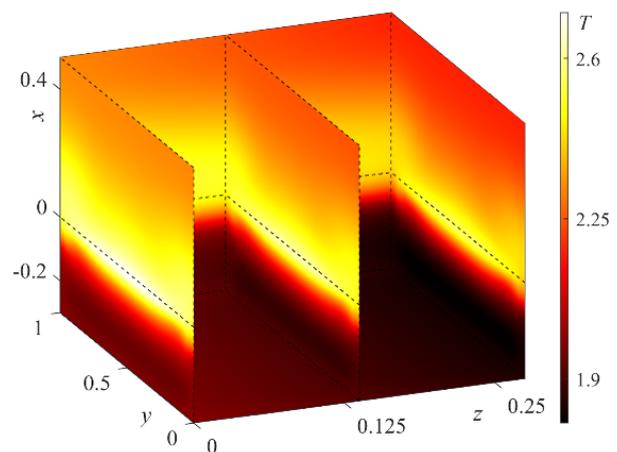


Рис. 3. Примеры распределений характеристик в системе сред «этанол–азот»: температура

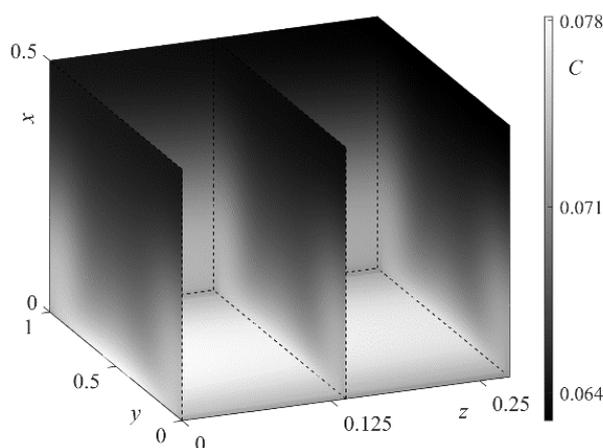


Рис. 4. Примеры распределений характеристик в системе сред «этанол–азот» концентрация пара

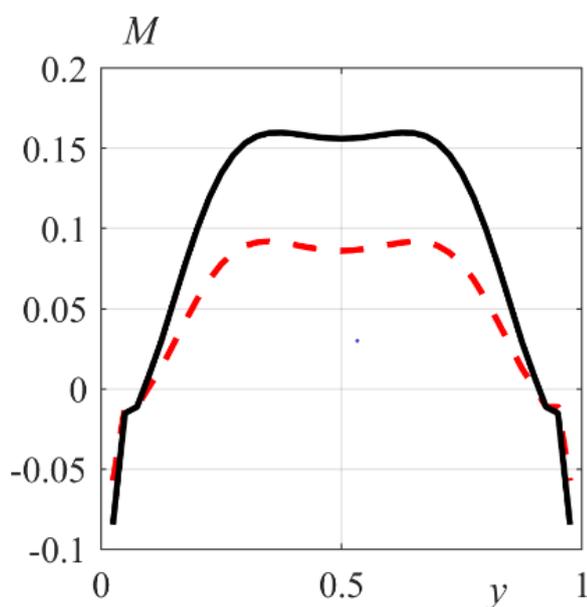


Рис. 5. Примеры распределений характеристик в системе сред «этанол–азот»: профили массовой скорости испарения при $T_{in} = 20\text{ °C}$ (штриховая линия) и $T_{in} = 30\text{ °C}$ (сплошная линия)

вившегося в канале с теплоизолированными стенками. При этом толщины жидкого и парогазового слоёв равны, соответственно, $l = 3\text{ мм}$ и $h = 5\text{ мм}$; течение развивается в условиях нормальной гравитации $g = 9.81\text{ м/с}^2$; исходная температура системы и продольный градиент температуры приняты равными $T_{in} = 20\text{ °C}$ и $A = 5\text{ °C/см}$ ($V_* = V_g = 0.00139\text{ м/с}$, $T_* = 10\text{ °C}$ – характерные скорость и температура). Профили массовой скорости испарения M на поверхности раздела представлены на Рис. 5.

Особенности двумерных решений

Двумерное точное решение задачи о конвекции в двухслойной системе с испарением (частично-инвариантное решение ранга 1 дефекта 2) позволяет провести моделирование однородного и неоднородного (относительно продольной координаты) испарения на границе раздела. Проведён анализ постановок краевых задач в двумерном случае для моделирования течений испаряющейся жидкости, увлекаемой спутным потоком газа в горизонтальном канале. Задачи различаются типом температурного и концентрационного режимов на стенках канала. Проведена классификация типов конвективных течений, расширяющая классификацию Наполитано; описаны чисто термокапиллярные течения, течения смешанного и пуазейлевского типов, их характеристики и механизмы. Изучены вопросы устойчивости течений. Проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, позволяющее указать область применимости двумерного точного решения.

Список литературы

- [1] Lyulin Yu., Kabov O. Thermal effect in the evaporation process from the interface of the horizontal liquid layer under a shear gas flow // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2023. V. 11(1). Pp. 55–64.
- [2] Бекежанова В.Б., Гончарова О.Н. Задачи испарительной конвекции (обзор) // *Прикладная математика и механика*. 2018. Т. 82(2). С. 219–260.
- [3] Bekezhanova V.B., Goncharova O.N. Thermocapillary convection with diffusive-type evaporation in a three-dimensional channel under the conditions of combined thermal load // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2022. V. 10(2). p. 11–30.
- [4] Шефер И. А. Влияние поперечного перепада температур на устойчивость двух слойных течений жидкости с испарением // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2019. №5. С. 15–25.