

Исследование задачи о двухслойном течении по наклонной подложке при условии полной абсорбции пара¹

Макаров Е.Е.

*Алтайский государственный университет, г. Барнаул
evgeniimakarov1995@gmail.com*

Аннотация

В статье решены следующие задачи: осуществлена постановка задачи о двухслойном течении по наклонной подложке с учётом испарения на границе раздела и изучено влияние различных физико-химических параметров на структуру течения. Для моделирования течений жидкости и газопаровой смеси используется система уравнений Навье-Стокса в приближении Обербека-Буссинеска. Точное решение задачи построено на основе дифференциальных уравнений конвекции и соотношений на твёрдых границах области течения и границе раздела. Изучено влияние изменения угла наклона подложки и интенсивности температурного режима на характер течения. Для функции концентрации пара на верхней стенке канала рассмотрен случай полной абсорбции.

Ключевые слова: двухслойные течения, конвекция, испарение, граница раздела, термомодиффузия, математическая модель, точные решения.

1. Введение

Конвективные течения играют очень важную роль во многих природных и промышленных системах. Большинство из них довольно сложны для изучения в силу существования множества факторов, влияющих на характер течений. Конвективные течения, сопровождающиеся испарением на границе раздела, уже на протяжении многих лет активно изучаются как теоретически, так и экспериментально [1, 2]. В работе [3] изучены конвективные течения жидкости и сопутствующего потока газа, сопровождающиеся испарением на границе раздела. Было проведено исследование этих течений на основе математической модели, учитывающей испарение на термокапиллярной границе, а также эффекты Соре и Дюфура в газопаровом слое. Были представлены точные решения течения в канале с недерфомированной границей раздела, и проведено исследование характера течения при различных внешних факторах для системы HFE-7100 (жидкость) – азот (газ). Было произведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными. В [4] построено точное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости, смоделированы продольные и поперечные градиенты температуры, выявлены особенности взаимодействия различных механизмов конвекции в гравитационном поле различной интенсивности. Цель работы – исследование двухслойных течений с учётом испарения на термокапиллярной границе раздела. Произведена постановка задачи двухслойного течения жидкости и сопутствующего потока газа по наклонной подложке и граничных условий

¹Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Современные методы гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики» (номер темы: FZMW-2020-0008).

на твёрдых стенках и границе раздела. Задача изучается при условии полной абсорбции пара на верхней стенке канала. Изучено влияние величины угла наклона и интенсивности температурного режима на характер течения.

2. Постановка задачи о двухслойном течении по наклонной подложке при условии полной абсорбции пара

Рассмотрим две среды: несмешивающиеся вязкую несжимаемую жидкость и смесь газа и пара, которые заполняют бесконечные слои толщиной l и h соответственно. Система координат выбрана следующим образом: граница раздела проходит по оси абсцисс ($y = 0$), а вектор силы тяжести \vec{g} направлен под углом φ по отношению к каналу ($\vec{g} = (g_1, g_2) = (g \cos \varphi, -g \sin \varphi)$) (см. рисунок 1). Верхняя ($y = h$) и нижняя ($y = -l$) стенки канала являются твёрдыми непроницаемыми границами, а общая граница раздела ($y = 0$) остаётся недеформированной. Для моделирования течений жидкости и газопаровой смеси используется система уравнений Навье-Стокса в приближении Обербека-Буссинеска и серия граничных условий (условия прилипания, непрерывность скорости и температуры, полная абсорбция пара, кинематическое и динамические условия, заданы температурный режим и расход газа, баланс теплового потока с учётом диффузионного потока массы испаряющейся жидкости, концентрация насыщенного пара на границе раздела). Концентрация пара в газе считается пассивной примесью, т.е. не влияющей на свойства газа, и она определяется уравнением диффузии. В газопаровом слое учитываются эффекты Соре (появление в смеси вследствие разности температур градиента концентрации компонентов) и Дюфура (возникновение разности температур в многофазной системе вследствие разности концентраций компонент смеси).

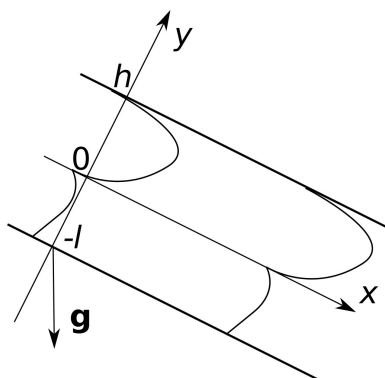


Рисунок 1. Геометрия области течения

Решения системы уравнений, используемой для моделирования течения, имеют специальный вид Остроумова-Бириха [5–7].

3. Изучение влияния величины угла наклона и температурного режима на характер течения

Изучено влияние угла наклона канала, расхода газа и теплового режима на твердых стенках на характер течения. Проведены исследования течений в системе “НФЕ-7100-азот” в условиях нормальной гравитации и физико-химических параметров согласно [3, 8].

На рисунке 2 представлены профили скорости (рисунок 2(a)), температуры (рисунок 2(b)) и концентрации пара (рисунок 2(c)) с учётом влияния теплового режима на характер течения. Профили скорости близки к параболическому типу. Наблюдается прямая зависимость от величины нагрева на интенсивность течения в обоих слоях. Температурный режим вносит количественные изменения в функцию концентрации пара, не внося качественных, профили близки к линейному типу.

На рисунке 3 представлены профили скорости (рисунок 3(a)), температуры (рисунок 3(b)) и концентрации пара (рисунок 3(c)) с учётом влияния незначительного изменения угла наклона канала. теплового режима на характер течения. При увеличении угла наклона подложки интенсивность течения в нижней фазе увеличивается, профиль скорости близок к параболическому типу. Профили температуры и концентрации пара имеют линейный тип и изменение угла наклона подложки (на $5 - 10^\circ$) не влечёт никаких существенных количественных и качественных изменений.

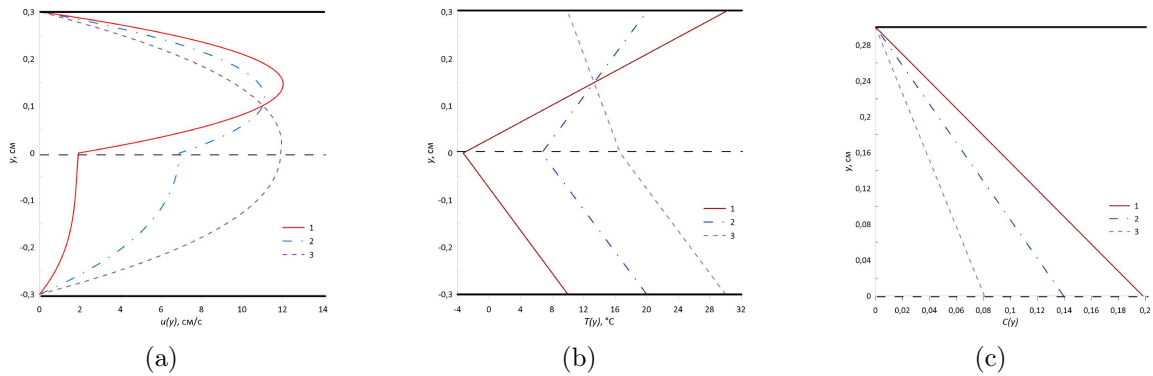


Рисунок 2. Профили (a) скорости ; (b) температуры; (c) и концентрации в системе NFE-7100–азот. Нагрев на нижнюю и верхнюю стенки канала, соответственно, 10°C и 30°C (1), равномерный (20°C), 30°C и 10°C (3).

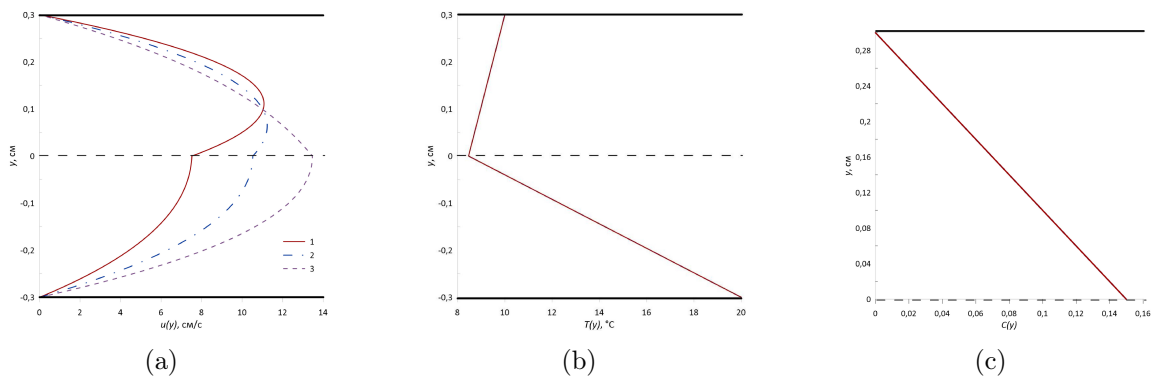


Рисунок 3. Профили (a) скорости ; (b) температуры; (c) и концентрации в системе NFE-7100–азот. Угол наклона канала соответственно, 10° (1), 15° (2), 20° (3).

Список литературы

1. Андреев В.К., Гапоненко Ю.А., Гончарова О.Н., Пухначев В.В. Современные математические модели конвекции. — М. : Наука, 2008. — 368 с.
2. Резанова Е.В. Моделирование конвективных течений с учётом теплопереноса на границах раздела: дис. ...канд. физ-мат. наук: 01.02.05. — 2018.
3. Гончарова О.Н., Резанова Е.В., Люлин Ю.В., Кабов О.А. Изучение конвективных течений жидкости и спутного потока газа с учетом испарения // Теплофизика высоких температур. — 2017. — Т. 55, № 6. — С. 720–732.
4. Гончарова О.Н., Южкова Ю.Е. Моделирование конвективного течения в наклонном слое с движущимися границами // Известия АлтГУ. — 2010. — № 1-1(65). — С. 22–29.

5. Бирих Р.В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости // ПМТФ. — 1966. — № 3. — С. 69.
6. Остроумов Г.А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. — М.; Л. : Гостехиздат, 1952. — 256 с.
7. Шлиомис М.И., Якушин В.И. Конвекция в двухслойной бинарной системе с испарением // Уч. зап. Пермск. гос. ун-та. Сер. Гидродинамика: Сб. науч. тр. — 1972. — № 4. — С. 129.
8. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. Равделя А.А., Пономаревой А.М. — СПб. : Спец. лит., 1998. — 232 с.