

МІФ  ММФ

# ТЕЗИСЫ



1

2016

*НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А. В. ЛЫКОВА*

# *ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ И СООБЩЕНИЙ*

*Том 1*

*XV Минский международный форум по тепло- и массообмену  
XV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum  
23 – 26 мая 2016 г.*

*Минск 2016*

### Обозначения

$D$  – диаметр капли, мм;  $n$  – угловая скорость, об/с;  $\beta$  – угол, характеризующий отклонение ориентации «каверны» от радиального направления;  $\vec{\omega}$  – вектор ускорения массовых сил;  $\omega_r$  – радиальная компонента вектора ускорения массовых сил;  $\omega_\varphi$  – тангенциальная компонента вектора ускорения массовых сил.

### Литература

1. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. – 464 с.
2. Васенин И. М., Архипов В. А., Бутов В. Г., Глазунов А. А., Трофимов В. Ф. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1986. – 261 с.
3. Harper E. Y., Grube G. W., I-Dee Chang. On the breakup of accelerating liquid drops // J. Fluid Mech. 1972. Vol. 52, Pt 2. Pp. 565–591.
4. Пат. МПК В01L 99/00. Российская Федерация. Устройство для исследования устойчивости движения капель / Архипов В. А., Березиков А. П., Васенин И. М., Трофимов В. Ф., Усанина А. С., Шрагер Г. Р. – № 2394649; заявл. 27.04.2009; опубл. 20.07.2010, электронный бюл. «Изобретения. Полезные модели». № 33.

УДК 533.15:536.25

## ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКТИВНОГО МАССООБМЕНА В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ С ГАЗОМ-РАЗБАВИТЕЛЕМ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

М. К. Асембаева<sup>1</sup>, Ю. И. Жаврин<sup>1</sup>, М. С. Молдабекова<sup>2</sup>, О. В. Федоренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,  
Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. Абая, г. Алматы, Казахстан

Практически любое состояние газа или жидкости при изменении внешних условий может испытывать структурные превращения [1]. Очевидно, что существование режимов носит пороговый характер, и изменение их состояния связано с определенными значениями безразмерных параметров, например, чисел Рейнольдса, Релея, Маха и т. д. Многообразие режимов смешения значительно возрастает при исследовании многокомпонентных систем. Интенсивность теплопереноса в них, как правило, определяется молекулярным, конвективным, а чаще всего совместным действием перечисленных режимов [2]. При этом практически не принимается во внимание факт, что при диффузии может иметь место неустойчивость механического равновесия системы с последующим возникновением естественной конвекции [3, 4], которая заметно интенсифицирует суммарный массоперенос. Причем возникновение и развитие концентрационной гравитационной конвекции возможно не только в рамках традиционных представлений тепловых задач Рэлея [1, 5, 6], но и для ситуаций, когда движения возникают при устойчивой стратификации смеси [7]. В многокомпонентных газовых смесях возникновение конвекции связано с различием в коэффициентах взаимной диффузии компонентов и соотношениями между значениями парциальных градиентов концентраций [7], а для неизотермических условий и градиента температуры [8]. Как показали опыты, проведенные в [8–10], за счет разной подвижности

компонентов образуются стратифицированные по плотности области, которые в поле силы тяжести при определенных воздействиях могут служить причиной возникновения конвекции. Поэтому решение вопросов, связанных с определением механизма смены кинетических режимов «диффузия – конвекция» в многокомпонентных газовых смесях, параметров, определяющих возникновение конвективного режима, являются важными для задач конвективного теплопереноса.

В данной работе представлены опытные данные по изучению диффузионного и конвективного смешения в изотермической бинарной газовой смеси в равной степени разбавленной третьим газом при различных давлениях. Для теоретического анализа использована расчетная модель по определению границы смены режимов «диффузия – конвекция» в вертикальном цилиндрическом канале кругового сечения. Суть исследования состояла в том, что два диффундирующих в противоположных направлениях газа – гелий и метан – разбавлялись пропаном. Коэффициенты диффузии компонентов имеют следующие значения:  $(D_0)_{\text{He-CH}_4} = 0.680 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $(D_0)_{\text{He-C}_3\text{H}_8} = 0.409 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $(D_0)_{\text{CH}_4\text{-C}_3\text{H}_8} = 0.158 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  при  $p = 0.101 \text{ МПа}$  и  $T = 298.0 \text{ К}$ . Если при всех прочих равных условиях начальный градиент концентрации балластного газа всегда равен нулю, то эти два компонента имеют собственные градиенты концентрации, которые, несомненно, повлияют на возникновение диффузионной неустойчивости.

Для изучения диффузионного и конвективного переноса использовался метод двух колб [9]. Этот метод успешно себя зарекомендовал при исследовании изотермического [7] и неизотермического [8] массопереноса, а также при изучении вопросов разделения многокомпонентных газовых смесей при вращении [10]. Поэтому следует ожидать, что полученные опытные данные будут достоверны. Анализ газовых смесей после смешения проводился хроматографическим способом.

Схема установки приведена на рис. 1 и включает в себя две части. Первая – это блок подготовки газов, который состоит из манометров 12, измеряющих давление в колбах, емкости 13 для выравнивания давления в колбах диффузионного аппарата, а также кранов 1–10 для заполнения колб аппарата соответствующими смесями из баллонов 20 и 21. Манометры были снабжены специально изготовленными мембранными разделителями 11. Вторая часть установки – диффузионный аппарат с равными объемами колб:  $V_1 = V_2 = (76.2 \pm 0.5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ . Колбы соединялись вертикальным цилиндрическим каналом длиной  $L = (70.00 \pm 0.05) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и диаметром  $d = (4.00 \pm 0.02) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Продолжительность опытов составляла 1 ч, что позволяло получить полную информацию о характере изучаемого массопереноса. При заполнении и для контроля давления во время опытов использовались образцовые манометры со специально изготовленными мембранными разделителями 11.

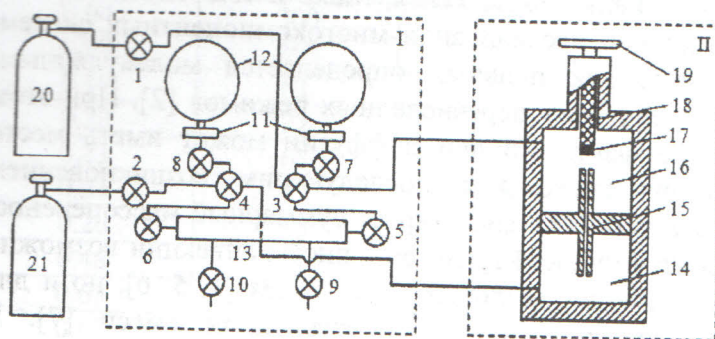


Рис. 1. Схема экспериментальной установки двухколбового метода: I – блок подготовки газов; II – термостат с двухколбовым аппаратом; 1–10 – краны; 11 – мембранные разделители; 12 – образцовые манометры; 13 – выравнивающая емкость; 14 – нижняя колба; 15 – диффузионный канал; 16 – верхняя колба; 17 – фторопластовая таблетка; 18 – шток; 19 – вороток; 20, 21 – колбы с газами

Эксперименты проводились по методике, предложенной в работах [7, 9]. Верхняя 16 и нижняя 14 колбы аппарата заполнялись исследуемыми газами из баллонов 20 и 21 до давления опыта. Герметичность при заполнении колб обеспечивалась фторопластовой

таблеткой 17. С помощью воротка 19 поднимался шток 18, открывая соединяющий колбы канал 15. Одновременно фиксировалось время начала процесса смешения. По окончании опыта канал перекрывался и проводился анализ газовой смеси из каждой колбы на хроматографе. Погрешность анализа концентрации хроматографом соответствовала 0.5%.

Для исследования была выбрана система  $0.430\text{C}_3\text{H}_8 + 0.570\text{He} - 0.420\text{C}_3\text{H}_8 + 0.580\text{CH}_4$ . Опыты проводились в диапазоне давлений от 0.4 до 2.0 МПа при температуре 298.0 К.

Результаты экспериментального исследования для системы  $0.430\text{C}_3\text{H}_8 + 0.570\text{He} - 0.420\text{C}_3\text{H}_8 + 0.580\text{CH}_4$  представлены на рис. 2 в виде зависимости количества продиффузировавшего пропана (мольная концентрация компонента) при различных давлениях опыта.

Экспериментальные данные, представленные на рис. 2, показывают, что при давлении до 0.5 МПа концентрация газа-разбавителя, равномерно распределенного в начальный момент времени в колбах аппарата, остается постоянной. Это соответствует диффузионному процессу смешения газов. Дальнейшее увеличение давления приводит к тому, что концентрация пропана увеличивается в нижней колбе аппарата. В верхней колбе концентрация газа-разбавителя соответственно уменьшается, что свидетельствует о нарушении устойчивого характера диффузии и появлении конвективных потоков – диффузионной неустойчивости. Как видно из приведенного графика, конвективное смешение имеет сложный характер: при давлении около 0.8 МПа направление конвективного потока поменялось на противоположное, затем при давлении 1.4 МПа опять происходит изменение направления потока балластного газа. Эти отклонения не укладываются в величину погрешности эксперимента (3–5%).

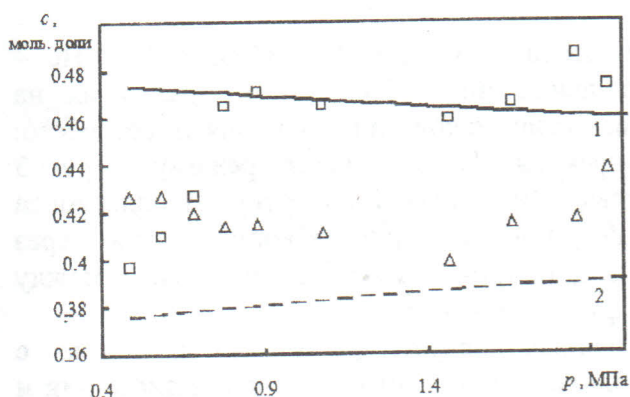


Рис. 2. Зависимость перешедшей концентрации  $\text{C}_3\text{H}_8$  от давления. Точки – экспериментальные данные для верхней и нижней колбы диффузионного аппарата; 1, 2 – вычисление значения концентрации  $\text{C}_3\text{H}_8$  в верхней и нижней колбах в предположении устойчивого диффузионного процесса

Математическое описание базируется на основе анализа системы уравнений механики сплошных сред для многокомпонентных систем по отношению к малым возмущениям [1]. Макроскопическое движение изотермической тройной газовой смеси описывается общей системой уравнений гидродинамики, которая включает в себя уравнения Навье – Стокса, сохранения числа частиц смеси и компонентов. Решение этой системы уравнений для цилиндра кругового сечения позволило получить в терминах чисел Рэлея граничное соотношение, определяющее смену режимов «диффузия – конвекция» в виде [11]

$$\tau_{11} \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \right) \text{Ra}_1 + \left( \tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \right) \text{Ra}_2 = \gamma^4 (\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}), \quad (1)$$

где  $\tau_{ij} = D_{ij}^* / D_{22}^*$  – параметры, определяющие соотношение между практическими коэффициентами диффузии;  $\gamma = \text{Ra}^{1/4}$ , т. е.  $\gamma = (\text{Ra}_1 \tau_{11} K_1 + \text{Ra}_2 K_2)^{1/4}$ ;  $K_1 = \frac{\left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \right)}{(\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21})}$ ,  $K_2 = \frac{\left( \tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \right)}{(\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21})}$ ;

$A_i$  – парциальный градиент концентрации  $i$ -го компонента;  $Ra_i$  – парциальное число Рэлея  $i$ -го компонента.

Согласно рис. 3 уравнение (1) дает на плоскости ( $Ra_1, Ra_2$ ) граничную прямую (линия I), разделяющую области затухающих (диффузия) и нарастающих (концентрационная конвекция) возмущений.

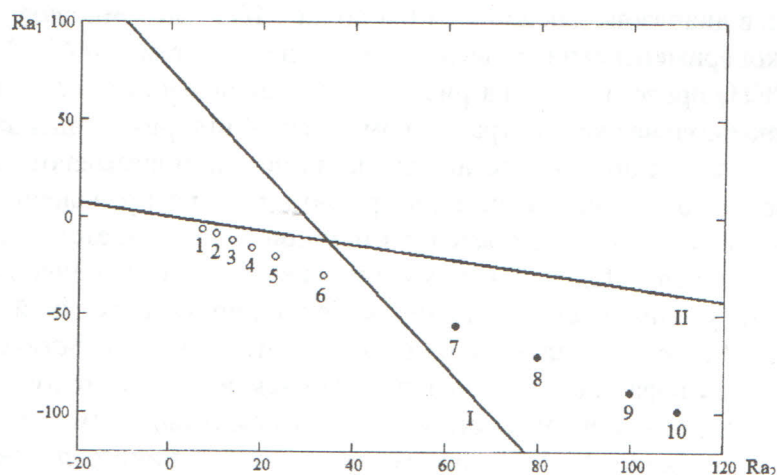


Рис. 3. Области диффузии и конвекции для системы  $0.430C_3H_8 + 0.570He - 0.420C_3H_8 + 0.580CH_4$ : I – нейтральная линия монотонных возмущений; II – линия нулевого градиента плотности; 1 – 10 – опытные данные при различных значениях  $p$ : 1 – 0.49; 2 – 0.58; 3 – 0.68; 4 – 0.78; 5 – 0.88; 6 – 1.07; 7 – 1.47; 8 – 1.66; 9 – 1.86; 10 – 1.96 МПа

Восстановим экспериментальные данные, соответствующие  $0.430C_3H_8 + 0.570He - 0.420C_3H_8 + 0.580CH_4$  (рис. 2) через парциальные числа Рэлея и отобразим их на координатной плоскости ( $Ra_1, Ra_2$ ). Из опыта известно, какой тип смешения имеет место: устойчивый (диффузия) или неустойчивый (конвекция). Неустойчивому режиму на рис. 3 соответствуют темные точки, а диффузии – светлые. Совокупность таких точек на плоскости чисел Рэлея (рис. 3) определяет переход из диффузионной области в конвективную через граничную линию устойчивости (1). Нетрудно видеть удовлетворительное согласие между теорией и опытом по определению областей диффузии и конвекции.

Таким образом, из экспериментальных данных следует, что в газовых смесях с балластным газом при повышении давления наблюдаются области устойчивой диффузии и неустойчивого конвективного смешения. Направление потока балластного газа изменяется в зависимости от давления. Это, по-видимому, связано со сложным характером неустойчивого процесса смешения и проявлением реальных свойств смешивающихся газовых смесей. Граница смены режимов «диффузия – концентрационная гравитационная конвекция» может быть получена в рамках анализа на устойчивость механического равновесия газовой смеси. Сравнение с опытом показало удовлетворительное согласие между теорией и опытом по определению областей диффузии и конвекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (проект № 3482/ГФ4).

### Литература

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. – 392 с.
2. Taylor R., Krishna R. Multicomponent mass transfer. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
3. Kaminskii V. A., Obvintseva N. Yu. Evaporation of a liquid under the conditions of convective instability in the gas phase // Rus. J. Phys. Chem. A. 2008. Vol. 82, No. 7. Pp. 1215–1220.

4. Kaminskii V. A. Modes of three-component diffusion in gases // *Rus. J. Phys. Chem. A*. 2011. Vol. 85, No. 12. Pp. 2203–2208.
5. Cook A. W., Dimotakis P. E. Transition stages of Rayleigh-Taylor instability between miscible fluids // *J. Fluid Mech.* 2001. Vol. 443. Pp. 69–99.
6. Linden P. F., Redondo J. M., Youngs D. I. Molecular mixing in Rayleigh–Taylor instability // *J. Fluid Mech.* 1994. Vol. 265. Pp. 97–124.
7. Zhavrin Yu. I., Kosov V. N., Kul'zhanov D. U., Karataeva K. K. Effect of the pressure on type of mixing in a three-component gas mixture containing a component possessing the properties of a real gas // *Tech. Phys. Letters*. 2000. Vol. 26, No. 12. Pp. 1108–1109.
8. Trengove R. D., Robjohns H. L., Dunlop P. J. Diffusion coefficients and thermal diffusion factors for the systems  $H_2-N_2$ ,  $D_2-N_2$ ,  $H_2-O_2$  and  $D_2-O_2$  // *Phys. Chem.* 1983. Vol. 87. Pp. 1187–1190.
9. Seleznev V. D., Kosov V. N., Poyarkov I. V. et al. Double-diffusion in Ar- $N_2$  binary gas system at the constant value of temperature gradient // *Acta Phys. Pol. A*. 2013. Vol. 123, No. 1. Pp. 62–66.
10. Zhavrin Yu. I., Kosov V. N., Kul'zhanov D. U., et al. Effect of cell rotation speed on mutual diffusion in a three-component gas mixture // *Tech. Phys. Letters*. 2003. Vol. 29, No. 2. Pp. 108–110.
11. Косов В. Н., Федоренко О. В., Жаврин Ю. И., Мукамеденкызы В. Неустойчивость механического равновесия при диффузии в трехкомпонентной газовой смеси в вертикальном цилиндре кругового сечения // *ЖТФ*. 2014. Т. 84, № 4. С. 15–18.

УДК 517.958:531.12; 66.021.1:536.2

### ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПЛЕНОЧНОМ ТЕЧЕНИИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ ПО ОБОГРЕВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЕЕ НАГРЕВА

Ф. Г. Ахмадиев, Р. М. Гильфанов

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия*

Рассматривается теплообмен при ламинарном пленочном неизотермическом установившемся течении двухфазной неньютоновской среды по обогреваемой поверхности под действием массовых сил. Такие неизотермические пленочные течения двухфазной среды по обогреваемой твердой поверхности реализуются во многих аппаратах пищевой, химической, нефтехимической и других отраслях промышленности (теплообменниках, диспергаторах, испарителях и т. д.). При рассмотрении процессов, в которых реализуются такие течения, важным является определение длины обогреваемой поверхности, на которой устанавливается равновесное распределение температуры в пленке.

Уравнения механики гетерогенных сред, описывающие плоское или осесимметричное неизотермическое тонкопленочное течение двухфазной среды по обогреваемой поверхности, при  $\varepsilon_{21} = H/L \ll 1$  и  $V_{ix_3} \approx 0$  согласно [1] в ортогональной системе координат  $x_1, x_2, x_3$ , связанной с поверхностью течения, записываются в виде

$$\frac{\partial(H_2 H_3 \rho_i U_i)}{\partial x_1} + \frac{\partial(H_1 H_3 \rho_i V_i)}{\partial x_2} = 0, \quad (1)$$

## СОДЕРЖАНИЕ

Приветствие участникам XV Минского международного форума по тепло- и массообмену.....	3
Минскому форуму по тепло- и массообмену 55 лет.....	4

### КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Абдулин М. З., Серый А. А. Исследование массообменных характеристик в струйно-нишевой системе сжигания топлива.....	9
Архипов В. А., Жарова И. К., Маслов Е. А., Борисов Б. В., Крайнов А. Ю. Исследование теплового режима при сверхзвуковом обтекании моделей прямооточных воздушно-реактивных двигателей.....	13
Архипов В. А., Золоторев Н. Н., Маслов Е. А., Усанина А. С. Движение частицы дисперсной фазы в поле центробежных массовых сил.....	16
Асембаева М. К., Жаврин Ю. И., Молдабекова М. С., Федоренко О. В. Особенности конвективного массообмена в многокомпонентных системах с газом-разбавителем в вертикальных каналах при различных давлениях.....	19
Ахмадиев Ф. Г., Гильфанов Р. М. Теплообмен при пленочном течении неньютоновской двухфазной среды по обогреваемой поверхности при различных режимах ее нагрева.....	23
Балунов Б. Ф., Лычаков В. Д. Теплоотдача к газовому потоку от труб с развитой внешней поверхностью теплообмена.....	28
Белов С. В., Жестков Г. Б., Муравский Д. В., Харьковский С. В., Щербакова Е. В. Расчетно-экспериментальное исследование внешнего теплообмена при конвективно-пленочном охлаждении элементов лопаток турбины высокого давления.....	32
Богатко Т. В., Дьяченко А. Ю., Смутьский Я. И., Терехов В. И., Ярыгина Н. И. Особенности отрывного течения за уступом под воздействием как положительного, так и отрицательного продольного градиента давления.....	35
Валуева Е. П., Пурдин М. С. Теплообмен при пульсирующем ламинарном течении в прямоугольных каналах.....	39
Винниченко Н. А., Плаксина Ю. Ю., Баранова К. М., Уваров А. В. Влияние свойств поверхностного слоя на перенос тепла вблизи границы раздела жидкость-газ.....	42
Воробьев М. А., Кашинский О. Н., Лобанов П. Д., Чинак А. В. Характерные режимы формирования мелкодисперсной газовой фазы в потоке жидкости.....	46
Габдрахманов И. Р., Миронов А. А., Щелчков А. В., Скрипник А. Н., Исаев С. А. Теплоотдача и гидросопротивление в каналах с системами цилиндрических выемок....	48
Генин Л. Г., Захаров А. Г., Крылов С. Г., Листратов Я. И. Исследование полей скорости и температуры при турбулентном течении ртути в кольцевом канале с закрученной лентой.....	52
Гильфанов К. Х., Сафин М. А., Минвалеев Н. Ю., Замалиева Г. И. Нестационарная конвекция горизонтального полуограниченного цилиндра при охлаждении поверхности.....	55
Гиниятуллин А. А., Тарасевич С. Э., Шишкин А. В., Яковлев А. Б. Конвективный теплообмен в канале с интенсифицированной скрученной лентой.....	57