

03

Разделение смесей и тепломассоперенос в связанных каналах

© А.Ф. Глухов, В.А. Демин, Г.Ф. Путин

Пермский государственный университет
E-mail: demin@psu.ru

Поступило в Редакцию 24 января 2008 г.

Изучены стационарные и колебательные режимы тепловой конвекции бинарной смеси в узких связанных каналах при действии положительной и отрицательной термодиффузии. Показано, что в случае положительной термодиффузии при малых надкритичностях имеют место специфические колебательные течения. Предложен механизм, объясняющий наблюдаемые явления, подтвержденный численным решением задачи. Выявлена возможность использования связанных каналов в технологических процессах по разделению жидких бинарных смесей на компоненты.

PACS: 44.35.+с, 47.60.Dx, 47.55.-t, 47.5.+a

Экспериментальная установка состояла из металлического стержня, в котором были выточены два продольных параллельных канала квадратного сечения шириной $2d = 3.2 \text{ mm}$ и высотой $h = 50 \text{ mm}$. Каналы соединялись сверху и внизу перемычками того же профиля, которые были снабжены массивными изотермическими теплообменниками (рис. 1, а). В результате при подогреве снизу создавалось однородное по сечению и линейное по длине стержня распределение температуры. Для проведения визуальных наблюдений каналы закрывались прозрачной пластиной, что позволяло напрямую наблюдать за течением. Интенсивность течения фиксировалась дифференциальной термопарой, установленной по высоте в середине каналов. Каждый спай термопары достигал центра канала и некоторым образом усреднял температуру в поперечном сечении. При сопоставлении результатов расчетов и термопарных измерений использовался эмпирический коэффициент осреднения. В части опытов в каналах были дополнительно размещены 11 термопар для измерения распределения температуры по высоте. ЭДС термопар измерялась цифровым прибором „Термодат“

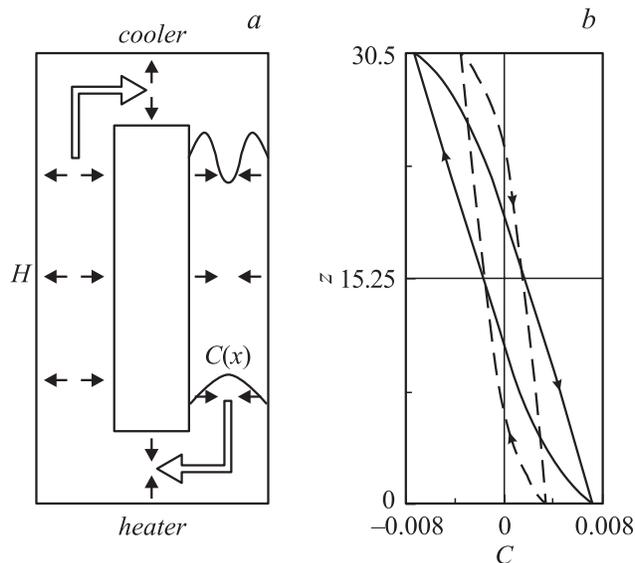


Рис. 1. Разделение смеси на компоненты: *a* — схема каналов и характерные профили концентрации примеси $C(x)$ в поперечном сечении; большие стрелки указывают направление движения жидкости; маленькие стрелки характеризуют термодиффузионное перераспределение примеси при нормальной термодиффузии; *b* — вертикальное распределение концентрации примеси вдоль правого и левого каналов (стрелки указывают направление течения), сплошная и штриховая линии — соответственно концентрация на оси канала и на расстоянии четверти ширины канала у стенки.

T29BM1. При использовании медь-константановых термопар прибор T29BM1 обеспечивал измерение температуры с разрешением 0.01°C . Измерительные приборы были подключены к USB-порту компьютера через конвертор и опрашивались при помощи программы Termodat 7.29. Автоматизированная система измерений была разработана при участии предприятия „Система контроля“ (г. Пермь). Перед заливкой в каналы смеси тщательно перемешивались в течение 10–15 min путем интенсивных взбалтываний. В качестве рабочих жидкостей использовались смесь четыреххлористого углерода CCl_4 и декана $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$, раствор сульфата натрия Na_2SO_4 в воде и раствор спирта в воде. Концентрационный

коэффициент плотности β_c таких смесей достаточно велик, так что даже малые градиенты концентрации создают сильные неоднородности плотности, которые могут быть причиной возникновения конвекции.

Несмотря на высокую теплопроводность металлических границ, тепловым взаимодействием левого и правого каналов в расчетах пренебрегалось. Система координат выбиралась так, чтобы ось z была направлена вдоль оси канала (γ — единичный вектор, направленный вертикально вверх). Условия подогрева таковы, что на вертикальных границах поддерживается линейное распределение температуры. При таком распределении температуры в жидкости возможно состояние механического равновесия. Для теоретического описания течений бинарных смесей воспользуемся уравнениями конвекции для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска [1]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = -\nabla p + \Delta \mathbf{v} + \frac{\text{Ra}H}{\text{Pr}}(T - C)\gamma, \quad \text{div } \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)T = \frac{1}{\text{Pr}}\Delta T, \quad \frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)C = \frac{1}{\text{Sc}}(\Delta C + \varepsilon\Delta T), \quad (2)$$

где \mathbf{v} , T , p , C — безразмерные поля скорости, температуры, давления и концентрации тяжелой примеси; H — безразмерная высота каналов. Эффекты, связанные с наличием примеси в жидкости, характеризуются коэффициентами диффузии D и термодиффузии α . В рамках приближения (1)–(2) предполагается, что потоки вещества и тепла обусловлены градиентами концентрации и температуры $\mathbf{J} = -\rho D(\nabla C + \alpha\nabla T)$, $\mathbf{q} = -\kappa\nabla T$, где ρ , κ — средняя плотность и коэффициент теплопроводности жидкости. Система уравнений (1)–(2) содержит четыре безразмерных параметра

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\chi}, \quad \text{Sc} = \frac{\nu}{D}, \quad \text{Ra} = \frac{g\beta_t\Theta d^3}{\nu\chi}, \quad \varepsilon = \frac{\alpha\beta_c}{\beta_t}. \quad (3)$$

Три из них — числа Прандтля, Шмидта и Рэлея (ν , χ , β_t — коэффициенты кинематической вязкости, температуропроводности и теплового расширения, Θ — перепад температур на верхнем и нижнем теплообменниках). Дополнительный безразмерный параметр ε описывает действие термодиффузии в смеси. На вертикальных границах каналов для скорости используется условие прилипания $\mathbf{v}|_{\Gamma} = 0$. Стенки каналов считаются идеально теплопроводными, поэтому возмущения

температуры на вертикальных границах расчетной области равны нулю. Помимо этого на твердых непроницаемых для вещества стенках каналов отсутствует нормальная компонента плотности диффузионного потока $J_n = 0$. Также накладывається условие нулевого расхода через сечение обоих каналов. В вертикальном направлении поля аппроксимировались тригонометрическим базисом и применялась галеркинская процедура осреднения. В поперечном сечении каналов краевая задача решалась методом конечных разностей. Компьютерный модуль был написан на языке программирования FORTRAN-90. В итоге удалось получить удовлетворяющее граничным условиям распределение концентрации в поперечном сечении канала, которое, как и ожидалось, по сравнению с полями температуры и скорости оказалось в расчетах самым сложным по структуре. Расчет стационарных течений удалось выполнить полуаналитически (рис. 2, амплитудные кривые 1, 2 и 3).

Эксперименты показывают, что тепловая конвекция бинарной смеси в связанных каналах возникает „жестко“ не зависимо от знака термодиффузии. Пороговое значение числа Рэлея, ниже которого жидкость возвращается в состояние механического равновесия, приблизительно равно критическому числу Рэлея для однородной жидкости. Критический перепад температуры для волны растворов составляет 6.3°C , а для раствора CCl_4 в декане $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ с весовой концентрацией 3% этот перепад равен 1.5°C . При сопоставлении результатов экспериментов с теорией будем использовать параметр надкритичности $\mu_t = \text{Ra}/\text{Ra}_c$. В случае положительной термодиффузии при превышении критического числа Рэлея Ra_c сначала имеют место колебательные течения, амплитуда которых меняется по гармоническому закону (рис. 2, кривая 4). С ростом надкритичности гармонические колебания сменяются сложными нелинейными колебаниями типа „перебросов“ (рис. 2, кривая 5 [2]). Временная эволюция „перебросового“ течения такова (рис. 2, фрагменты *b* и *c*): после переходного процесса в каналах устанавливается циркуляция определенного направления, на фоне которой вблизи некоторых средних величин наблюдаются колебания с более высокой частотой. Через определенное время, равное периоду „перебросов“, скорость в каналах начинает резко уменьшаться и направление закрутки меняется на противоположное. Причина смены закрутки связана с тем, что в канале, в котором наблюдалось подъемное течение, постепенно накапливается тяжелая примесь, а в канале с опускным течением возникает недостаток тяжелой примеси, в резуль-

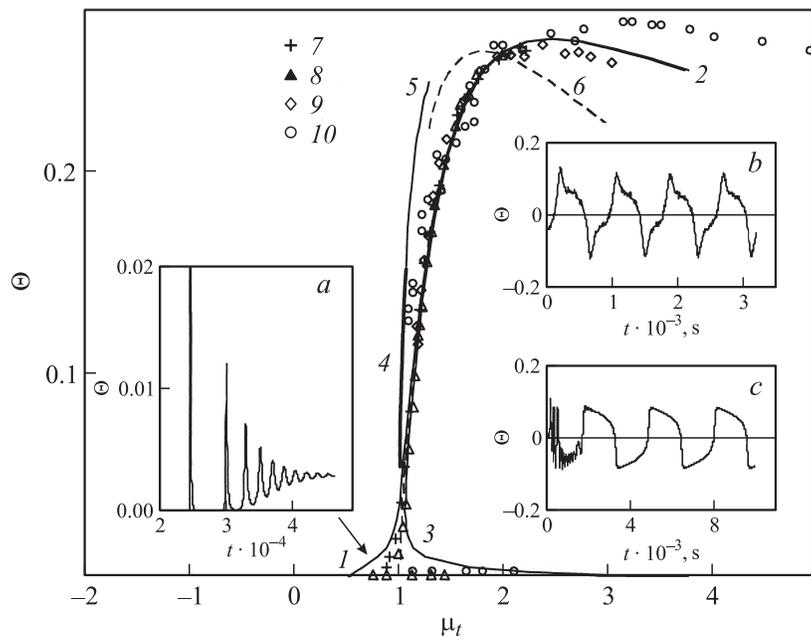


Рис. 2. Амплитудные кривые различных типов течений. Сплошные линии — теоретические кривые для $Sc=700$, $Pr=7$; 1, 3 — $\varepsilon = 0.02 - 0.015$; 2 — предельный $\varepsilon = 0$; 4, 5 — соответственно амплитуда гармонических и перебросовых колебаний; 6 — амплитуда стационарного течения, вычисленная методом конечных разностей. Экспериментальные точки: 7 — вода; 8 — раствор C_2H_5OH в воде (5%); 9 — раствор Na_2SO_4 в воде (15%); 10 — раствор CCl_4 в декане (разные концентрации). Фрагменты: *a* — установление стационарного течения через пикообразные выбросы; *b*, *c* — перебросовые колебания (соответственно эксперимент и теория).

тате чего течение затормаживается и направление закрутки меняется на противоположное. На первый взгляд может показаться, что при положительной термодиффузии колебательные движения невозможны. Каналы имеют в среднем разную температуру, и ожидается, что через верхнюю и нижнюю перемычки в канал с подъемным течением должна диффундировать легкая компонента. В действительности в канале с подъемным течением может накапливаться тяжелая примесь.

При протекании жидкости по длинным узким каналам с высокотеплопроводными гранями неизбежно возникают градиенты температуры в горизонтальной плоскости. В канале с подъемным течением вектор градиента направлен из потока к боковым стенкам, в канале с опускным течением — наоборот, от стенок к середине канала. Когда жидкость течет достаточно медленно, в канале с опускным течением из-за термодиффузии в середине потока накапливается тяжелая примесь и затем „конвективно“ переносится в канал с подъемным течением (рис. 1, *a*). Пока элемент жидкости движется вверх, тяжелая примесь перемещается из-за положительной термодиффузии к стенкам канала, т. е. выносится из потока. В результате примесь не возвращается обратно в канал с опускным течением, а накапливается в канале с подъемным течением, вследствие чего происходит торможение и возникает течение с противоположной закруткой, т. е. рождаются колебания. Дальнейшее увеличение надкритичности ($\mu > 1.5$ для смеси CCl_4 и $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ и $\mu_t > 1.1$ для раствора Na_2SO_4 в воде с весовой концентрацией 16%) приводило к тому, что период перебросов неограниченно возрастал, и система переходила в одно из двух устойчивых стационарных состояний с определенным направлением движения. Ниже экспериментального порога при положительной термодиффузии теория предсказывает существование медленных стационарных течений (рис. 2, кривая 1). Расчеты показывают, что выход на этот медленный режим происходит через пикообразные выбросы (рис. 2, фрагмент *a*) в течение очень длительного времени, величина которого на несколько порядков превышает время проведения среднестатистического эксперимента. В результате в обычном по времени эксперименте конвективный порог оказывается сильно завышенным и отвечает „жесткому“ возбуждению колебательной конвекции. Для смесей с отрицательным коэффициентом термодиффузии (водно-спиртовые смеси) в надкритической области ($1 < \mu_t < 2$) устанавливалась стационарная конвекция. Регулярных колебаний вблизи порога не наблюдалось. Это также согласуется с результатами расчетов (рис. 2, кривая 3). Зависимость концентрации примеси от вертикальной координаты приведена на рис. 1, *b* в режиме стационарного течения для набора параметров $\varepsilon = 0.02$, $H = 30.5$, $\text{Sc} = 1000$, $\text{Pr} = 7$. В канале с подъемным течением в среднем имеет место недостаток тяжелой примеси, а в канале с опускным течением — избыток. Таким образом, конвективная петля может использоваться как установка для разделения смесей на компоненты. Процесс разделения

смесей происходит в динамике, на фоне конвективного переноса, т.е. быстрее, чем в статике. В отличие от термодиффузионной колонны в связанных каналах отсутствуют встречные гидродинамические потоки, т.е. в области высоких надкритичностей течение дольше остается ламинарным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код р_Урал_а № 07-08-96035).

Список литературы

- [1] *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М.* Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
- [2] *Глухов А.Ф., Демин В.А., Путин Г.Ф.* // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 2. С. 13–23.