

УДК 532, 532.72, 538.93

Конвективные сепараторы

В.А. Демин

Методом прямого численного моделирования проведено исследование процесса разделения жидких бинарных смесей на компоненты в неоднородно нагретом наклонном слое с твердыми идеально теплопроводными границами при положительной термодиффузии. Определены углы наклона слоя и соответствующие числа Рэлея, при которых эффект расслоения на отдельные составляющие максимален. Проанализировано влияние стационарной конвекции на процесс термодиффузионного разделения в результате действия дополнительного механизма переноса компонентов в области с разными температурами. Обнаружено хорошее согласие результатов численных расчетов с экспериментальными данными, полученными ранее интерференционными методами.

PACS:02.70.—с

Ключевые слова: численное моделирование, жидкие бинарные смеси, разделение.

Введение

На протяжении уже многих десятилетий проблема термодиффузионного разделения жидких и газовых смесей привлекает пристальное внимание исследователей. Как правило, эти процессы протекают на фоне тепловой конвекции [1]. Задачи устойчивости термоконцентрационных течений, управление конвективными режимами в полостях с различной геометрией, методики расчета определенных характеристик многокомпонентных сред — все эти проблемы по-прежнему актуальны, а результаты востребованы в прикладных областях, в том числе атомной промышленности. Исторически термоконцентрационные течения начали изучаться с описания поведения бинарных молекулярных сред [2]. В настоящее время в этом направлении исследований наблюдается значительный прогресс, в том числе постепенно становятся доступными полные трехмерные расчеты. Так, прямое численное 3D-моделирование термоконцентрационной конвекции в кубической полости было проведено в [3] для водных растворов изопропанола различных концентраций, характеризующихся отрицательным эффектом Соре. Полость подогревалась сверху с целью создания неустойчивой стратификации при отрицательной термодиффузии. Исследование выполнялось с перспективой дальнейшего сравнения результатов расчетов с экспериментом. Правда задача рас-

сматривалась не как прикладная, а с точки зрения приложения методов, применяющихся в теории гидродинамической устойчивости и как предмет изучения данной науки. Интерес к задаче сформировался по причине того, что ранее в тонких горизонтальных слоях при отрицательной термодиффузии наблюдались сложные ячеистые движения различной симметрии и конкурирующие с ними валиковые структуры, была обнаружена пространственная поперечно-валиковая неустойчивость, режимы бегущих и стоячих волн.

Технически более сложной и практически более значимой является проблема термодиффузионного разделения многокомпонентных смесей. Влияние тепловой конвекции на термодиффузионное разделение тройной смеси в термогравитационной колонне теоретически исследовано в работе [4]. Традиционно термогравитационная колонна широко применяется как для промышленного разделения смесей, так и в научных целях для измерения значений термодиффузионных коэффициентов. В [4] проведено обобщение понятия параметра разделения смеси на случай многокомпонентных сред и осуществлен вывод соответствующих уравнений тепловой конвекции. Проанализированы различные аналитические решения представленных уравнений на случай стационарной тепловой конвекции в термогравитационной колонне для типичных тройных смесей.

Экспериментальные и теоретические исследования процессов разделения многокомпонентных смесей в значительной степени затруднены тем, что отсутствуют данные о термодиффузионных характеристиках интересующих сред. В последнее время для измерения концентрации компонентов жидких смесей наиболее активно

Демин Виталий Анатольевич, профессор.
Пермский государственный научный
исследовательский университет.
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.
Тел.: 8 908-24-25-26-7. E-mail: demin@psu.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2013 г.

© Демин В.А., 2013

используются интерференционные методы, для реализации которых необходимы значения показателей преломления. Даже для тройных смесей экспериментальное измерение показателей преломления — это чрезвычайно трудоемкая работа. В качестве примера можно привести работу [5], в которой можно найти полную базу данных по показателям преломления для тройной смеси циклогексана, толуола и метанола в зависимости от всевозможных дольных содержаний каждой фракции. К сожалению подобных экспериментальных работ с надежными результатами прямых измерений по многокомпонентным смесям чрезвычайно мало.

Наиболее эффективно и контролируемо разделение смесей происходит, когда система находится в стационарных условиях. С другой стороны, для определения коэффициентов диффузии и термодиффузии существуют подходы, основанные на использовании особенностей переходных режимов. Одна из таких методик предложена в работе [6] применительно к термогравитационной колонне стандартной конфигурации. Основным техническим достоинством метода является малое время его реализации. Правда, расчеты были выполнены в приближении, когда пренебрегалось влиянием состава смеси на плавучесть.

В работе [7] теоретически и экспериментально были изучены стационарные конвективные течения и припороговые автоколебательные режимы двухкомпонентных жидкостей в подогреваемых снизу длинных вертикальных связанных каналах. Аналитические расчеты стационарных течений [8] и численное моделирование автоколебательных режимов [9] показали возможность использования конвективной петли в качестве установки для разделения смесей на компоненты. Важным оказалось то, что в ходе циркуляционного течения всегда имеет место определенное нарушение симметрии между правым и левым связанными каналами. В канал с подъемным течением всегда входит жидкость, находившаяся до этого в соприкосновении с нагревателем, в то время как по другому каналу вниз течет жидкость, предварительно охлажденная верхним теплообменником. В результате канал с подъемным течением в среднем всегда имеет слегка более высокую температуру, нежели канал с опускным течением. Как следствие, через определенное время за счет явления термодиффузии в вертикальных каналах со стационарным циркуляционным течением должна установиться разная суммарная концентрация компонентов. Наличие в среднем разности концентраций в каналах может использоваться для получения раствора, обогащенного или обе-

дневного тем или иным компонентом, в зависимости от технологической необходимости. В дополнение численное моделирование для границ высокой теплопроводности показало, что за счет термодиффузии на любой высоте канала имеет место сложное распределение концентрации компонентов в поперечном сечении. Этот факт также может использоваться в ходе отбора смеси с нужной концентрацией из середины канала или пристеночной области. Однако прямых измерений концентрации компонентов в работах [7–9], подтверждающих результаты расчетов по разделению смесей, выполнено не было. Данные термодиффузионных измерений были сопоставлены с расчетными трехмерными полями температуры, что позволило опосредованно подтвердить термоконцентрационную природу наблюдаемых колебательных режимов. Важным результатом серии работ [7–9] стал вывод о немонотонном влиянии конвекции на термоконцентрационные явления в связанных каналах. С одной стороны, концентрационные эффекты проявляются только на фоне циркуляции смеси в конвективной петле, а с другой стороны, течение не должно быть слишком интенсивным, чтобы в процессе движения вдоль каналов примесь успевала перераспределяться в поперечном сечении, и не начали бы проявляться эффекты перемешивания жидкости при ее прохождении через горизонтальные перемычки.

В то же время гораздо более простой и эффективной гидродинамической системой, которая может быть использована для разделения не только жидких, но и газообразных смесей, является наклонный неоднородно нагретый слой. В зависимости от знака термодиффузии его можно подогревать как со стороны верхней, так и нижней граней. В работе [10] теоретически исследовано влияние наклона неоднородно нагретой прямоугольной полости на распределение концентрации компонентов жидкой бинарной смеси, сформированное положительной термодиффузией. Однако, аналитическое решение найдено в приближении линеаризованных уравнений тепловой конвекции для набора искусственных граничных условий, два из которых соответствовали свободным границам. Дополнительные численные расчеты методом конечных разностей ввиду ограниченности вычислительных мощностей на тот момент времени были выполнены только для короткого наклонного слоя с соотношением сторон $L/d = 2$ на довольно грубой сетке и для модельных значений числа Шмидта и термодиффузионного параметра. Было установлено, что при малых наклонах слоя относительно горизонтали интенсивность конвективного движения увеличивает-

ся пропорционально произведению угла наклона на число Рэлея. Следует отметить, что подробного анализа процесса разделения смеси в полости и практических рекомендаций по применению рассматриваемых явлений дано не было.

В работе [11] было экспериментально исследовано влияние тепловой конвекции на распределение компонентов жидких смесей, сформированное положительной термодиффузией в наклонной неоднородно нагретой прямоугольной полости. В опытах использовались водные растворы поваренной соли и сульфата натрия, отличающиеся от растворов других солей большими значениями коэффициента Соре и малыми коэффициентами диффузии. Интерференционными методами проведены прямые измерения полей концентрации компонентов. Найдены значения углов наклона слоя и числа Грасгофа, при которых эффект термодиффузионного разделения смесей максимален. Оказалось, что для наклонного слоя также справедлив вывод о немонотонном характере влияния тепловой конвекции на процесс разделения жидких смесей.

Целью данной работы являлось исследование процесса разделения жидких бинарных смесей на компоненты в неоднородно нагретом наклонном слое с твердыми идеально теплопроводными границами при положительной термодиффузии.

Постановка задачи

Рассмотрим замкнутый с торцов наклонный слой жидкости с твердыми непроницаемыми границами высокой теплопроводности. Выберем систему координат таким образом, чтобы ось z была направлена вдоль слоя, а ось x — перпендикулярна ему (рис. 1). В этой системе координат \vec{y} ($-\sin \phi$, 0 , $\cos \phi$) — единичный вектор, направленный вертикально вверх. Наклонный слой подогревается со стороны верхней длинной грани так, что на торцах полости устанавливается линейное распределение температуры. За исключением предельного случая горизонтального слоя $\phi = 90^\circ$ при таком нагреве в бинарной жидкости невозможно состояние механического равновесия. При лю-

бой самой малой разности температур $T_2 - T_1 > 0$ в жидкости имеет место длинноволновое течение с подъемным движением вдоль нагреваемой верхней длинной границы и опускным — вдоль нижней границы. Как будет показано ниже, именно такая геометрия позволяет наиболее эффективно разделять смеси на составляющие.

Краевая задача и безразмерные параметры

В ходе изучения термоконцентрационных явлений решалась модифицированная система уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска для бинарных молекулярных жидких смесей, полученная впервые в работе [12]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{\text{Pr}} (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \Delta \vec{v} + \text{Ra}(T - C) \vec{y}, \quad (1)$$

$$\text{div} \vec{v} = 0,$$

$$\text{Pr} \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) T = \Delta T,$$

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

Здесь \vec{v} , T , p , C — безразмерные поля скорости, температуры, давления и концентрации тяжелого компонента. В рамках приближения (1), (2) предполагается, что потоки вещества и тепла обусловлены градиентами концентрации и температуры следующим образом:

$$\vec{J} = -\rho D (\nabla C + \alpha \nabla T), \quad \vec{q} = -k \nabla T,$$

где k , D — коэффициенты теплопроводности и диффузии, ρ — средняя плотность жидкости. Здесь помимо прямых необратимых механизмов переноса вещества и тепла (диффузии и теплопроводности) присутствует перекрестный термодиффузионный эффект, приводящий к дополнительному перераспределению примеси в неоднородно нагретой жидкости, который характеризуется соответствующим коэффициентом α .

При обезразмеривании уравнений конвекции (1), (2) для бинарных смесей в качестве единицы измерения длины была выбрана полутолщина

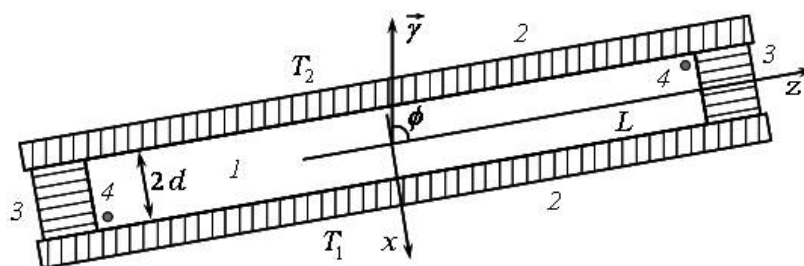


Рис. 1. Наклонный слой: 1 — конвективная полость, 2 — теплообменники, 3 — торцовые вкладыши, 4 — точки, между которыми проводилось измерение разности концентраций.

слоя d , времени — d^2/ν , скорости — ν/d , температуры — Θ , концентрации — $\Theta b_l/b_c$, давления — $\rho\nu^2/d^2$. Здесь b_l и n — коэффициенты теплового расширения и кинематической вязкости соответственно, Θ — разность температур между длинными сторонами полости. Концентрационный коэффициент плотности b_c описывает зависимость плотности смеси от концентрации

$$\beta_c = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial C} \right)_{T,p}$$

В нашем случае $b_c > 0$, т.к. любые концентрации NaCl или Na₂SO₄ в воде, для которых проводились расчеты, представляют собой тяжелую примесь. С учетом этих единиц четыре безразмерных параметра системы (1), (2) имеют следующий вид:

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

где g — ускорение силы тяжести, χ — коэффициент температуропроводности. Три из этих параметров — числа Прандтля, Шмидта и Рэлея. Дополнительный безразмерный параметр в задаче ε характеризует явление термодиффузии в смеси, где $\alpha = k_T/T$ (k_T — термодиффузионное отношение). В ходе расчетов на границах полости выполнялись стандартные условия для скорости и потока вещества:

$$\vec{v}|_{\Gamma} = 0, \quad \left(\frac{\partial C}{\partial \vec{n}} + \varepsilon \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right) \Big|_{\Gamma} = 0.$$

На длинных границах поддерживалась постоянная разность температур:

$$T|_{x=-1} = 1, \quad T|_{x=1} = -1.$$

На торцах слоя рассматривалось два варианта граничных условий: 1) линейное распределение температуры, 2) условие теплоизолированности:

$$z = \pm L/2 : 1) T = -x, \quad 2) \partial T / \partial \vec{n} = 0.$$

Неизменность температуры по времени на длинных границах моделирует их высокую теплопроводность. Геометрия задачи и экспериментальные данные позволяют рассматривать задачу в плоской постановке, поэтому дальнейшее рассмотрение будет вестись на основе уравнений, записанных в терминах функций тока $v_x = \partial \psi / \partial z$, $v_z = -\partial \psi / \partial x$.

Для удобства реализации расчетной процедуры введем в рассмотрение дополнительную переменную $F = C + \varepsilon T$. Для производной этой линейной комбинации концентрации и температуры выполняется более простое граничное условие $\partial F / \partial \vec{n}|_{\Gamma} = 0$. В терминах функции тока и завихренности уравнения (1) — (2) имеют вид:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{\text{Pr}} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = \Delta_1 \varphi - \tag{4}$$

$$-\text{Ra} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} (1 + \varepsilon) - \frac{\partial F}{\partial x} \right) \cos \phi + \left(\frac{\partial T}{\partial z} (1 + \varepsilon) - \frac{\partial F}{\partial z} \right) \sin \phi \right]$$

$$\text{Pr} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial z} = \Delta_1 T, \tag{5}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\text{Pr}} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial z} \right) = \frac{1}{\text{Sc}} \Delta_1 F + \frac{\varepsilon}{\text{Pr}} \Delta_1 T. \tag{6}$$

Здесь $\varphi = \Delta_1 \psi$ с точностью до знака представляет собой вихрь скорости, Δ_1 — плоский оператор Лапласа.

В предельном случае бесконечного вдоль оси z слоя справедливо аналитическое решение, описывающее плоскопараллельное течение:

$$u(x) = \frac{1}{6} \text{Ra} \cos \phi (1 + \varepsilon) (x^3 - x), \tag{7}$$

$$T(x) = -x, \quad C(x) = \varepsilon x + C_0, \tag{8}$$

$$p(x) = \text{Ra} \left[(1 + \varepsilon) \frac{x^2}{2} + C_0 x \right] \sin \phi - \tag{9}$$

$$-\text{Ra} \cos \phi C_0 z + p_0$$

Решение описывает течение с кубическим профилем скорости, линейными профилями температуры и концентрации; C_0 и p_0 — константы интегрирования. Это решение удовлетворяет всем перечисленным выше граничным условиям, вдобавок расход жидкости через сечение слоя равен нулю. Для вертикального бесконечного слоя подобное решение может быть найдено в [1].

Методика решения

В случае полости конечной длины система уравнений (4) — (6) для полей φ , ψ , T и F решалась численно методом конечных разностей. Компьютерный модуль был написан на языке программирования FORTRAN-90. Алгоритм был разработан в соответствии с явной схемой решения дифференциальных уравнений в частных производных. Расчетная схема была основана на двухполевой методике [13]. При аппроксимации производных по времени и производных по координатам использовались, соответственно, односторонние и центральные разности. Уравнение Пуассона для вихря скорости решалось методом простых итераций. Количество узлов в плоскости широких граней варьировалось в зависимости от геометрических параметров полости: 15—21 по оси x , и 151—241 вдоль оси y . В ходе расчетов использовался метод установления.

Разделение смесей на компоненты

Расчеты проводились для смесей с положительной термодиффузией $\varepsilon = 0.4$ и $\varepsilon = 1.4$. Первый коэффициент термодиффузии меньше единицы имеет значение, примерно соответствующее раствору NaCl в воде, второй коэффициент больше единицы — раствору Na_2SO_4 в воде. Начальная средняя массовая концентрация примесей принималась равной $\langle C \rangle = 0.15$. Угол наклона полости относительно вертикали варьировался в интервале $\phi = 80^\circ \div 90^\circ$ и отвечал экспериментам [11, 14]. Значения чисел Шмидта и Прандтля, определяющие отношение диффузионных и вязких свойств смеси к теплопроводным, принимались равными $Sc = 1000$, $Pr = 7.0$. Управляющим параметром задачи является число Рэлея, которое отвечает за интенсивность нагрева слоя. Для водных растворов солей по порядку величины оно должно быть приблизительно в десять раз больше чем число Грасгофа, использовавшееся в качестве безразмерного параметра в экспериментах [14]. В безразмерных единицах ширина и длина полости соответственно были равны $2d = 2$, $L = 20$. В ходе расчетов осуществлялся вывод полей для разных моментов времени, характерных для более медленного процесса установления поля концентрации в полости (в противоположность быстро устанавливающимся распределениям скорости и температуры). На рис. 2 приведены поля функции тока и температуры в режиме установившегося стационарного течения ($Ra = 3.0 \times 10^2$, $\phi = 86^\circ$). Как и в экспериментах в ходе численного моделирования на переходных стадиях каких-либо колебательных процессов зарегистрировано не было. Расчеты показывают, что в полости имеет место крупномасштабное течение, профиль которого при некотором удалении от торцов полости хорошо согласуется с аналитическим решением (7). Несмотря на разворот течения вблизи торцов, поле температуры растет практически по линейному закону от нижней холодной грани к горячей

во всем массиве, так что изолинии практически параллельны оси z .

В свою очередь численное моделирование для замкнутого наклонного слоя показывает, что в противоположность полям скорости и температуры наличие торцов сильно влияет на распределение концентрации примеси во всем объеме. В начальный момент времени примесь была равномерно распределена в полости. Дальнейшая эволюция поля концентрации проиллюстрирована двумя характерными стадиями на рис. 3. С началом движения (рис. 3, *a*) поле концентрации практически сразу видоизменяется: за счет конвективного переноса и термодиффузии примесь расслаивается вдоль слоя по координате z . А именно, вследствие некоторого отставания действия термодиффузионного механизма, изолинии концентрации сильно изгибаются, следуя профилю скорости. Это происходит по причине того, что на начальных этапах термодиффузионное разделение касается только приграничных слоев смеси. За счет положительной термодиффузии примесь вытесняется горячей длинной гранью в поток, что приводит к обогащению тяжелым компонентом подъемного течения. Вдоль противоположной грани имеет место опускное течение, которое обедняется примесью, т.к. тяжелый компонент устремляется к холодной грани. Впоследствии, когда, наконец, устанавливается стационарный режим, диффузионный, конвективный и термодиффузионный потоки компенсируются, возникает распределение, представленное на рис. 3, *b*.

Однако наиболее интересными с прикладной точки зрения являются результаты вторичной обработки численных данных. При установлении концентрационного поля, относительно медленно меняющегося с течением времени, расположение максимума и минимума концентрации примеси в случае положительной термодиффузии и фиксированном наклоне слоя определяется всегда однозначно. В режиме стационарного течения в самом верхнем углу полости имеет место минимум кон-

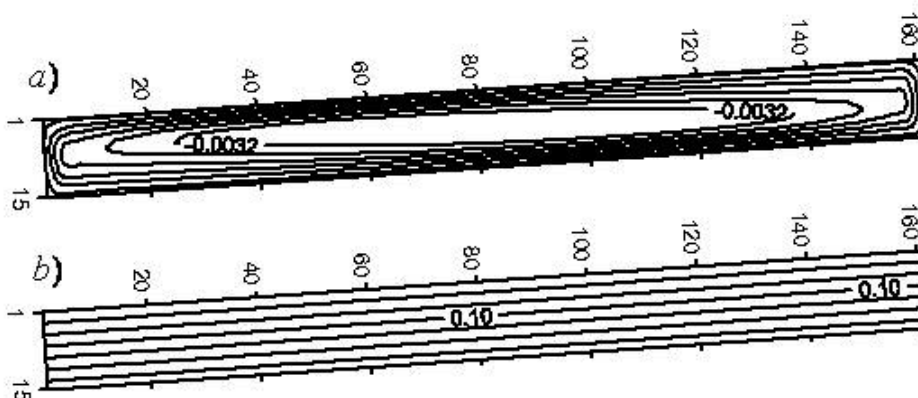


Рис. 2. Структура течения; *a*) — поле функции тока, *b*) — поле температуры.

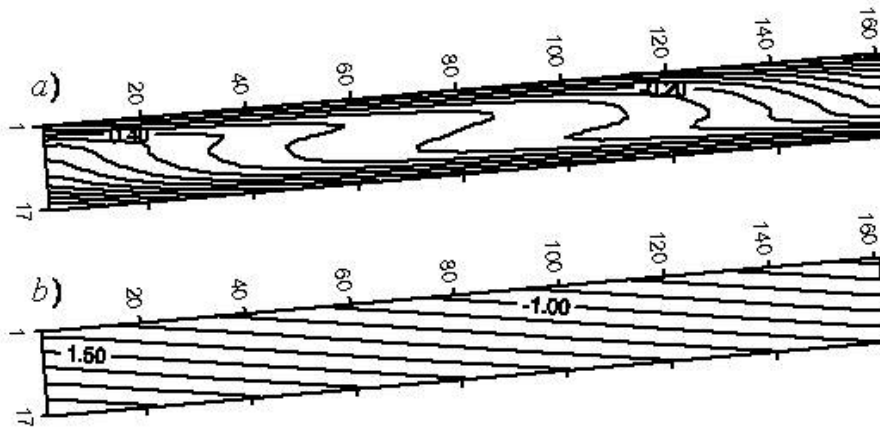


Рис. 3. Изолинии поля концентрации в разные моменты времени; а) — $t = 3 \times 10^2$ (4 мин), б) — $t = 5 \times 10^3$ (64 мин). Расчет соответствует набору параметров $Pr = 7$, $\varepsilon = 1.4$, $Sc = 10^3$, $Ra = 1.3 \times 10^2$, $\phi = 85^\circ$.

центрации примеси, а в самом нижнем — максимум. Следует обратить особое внимание, что подобное, кажущееся простым и естественным, поведение является следствием нетривиального взаимодействия трех разных механизмов: положительной термодиффузии, нагрева со стороны верхней широкой грани и наклона слоя. Примесь эффективно накапливается в самом нижнем углу наклонной полости не только потому, что является тяжелым компонентом, но еще и за счет единственно правильно организованного нагрева. Нагрев со стороны верхней длинной грани, с одной стороны, создает в среде дополнительный термодиффузионный поток к нижней холодной стенке, а, с другой стороны, — медленное опускное движение вдоль нее, конвективно переносящее примесь в самую нижнюю точку полости. В результате всего 30–50 мин требуется, чтобы при определенном наборе внешних параметров в водно-солевых растворах установилось статическое распределение концентрации с максимально

возможным разделением смеси на компоненты. Эффективность разделения зависит от интенсивности нагрева и угла наклона слоя. Графики разности концентраций $\Delta C = C_{\max} - C_{\min}$ в зависимости от угла наклона слоя изображены на рис. 4 для разных значений числа Рэлея. Слева на рис. 4а представлены значения $\Delta C(\phi)$ в единицах $\Theta\beta_l/\beta_c$, справа (рис. 4, б) — в исходных долях. Переводя значения ΔC в изначальные единицы измерения, вырождение у графиков $\Delta C(\phi)$ по разности температур Θ снимается и становится очевидным сильное влияние этого фактора на разделение смесей (разница в концентрации до 20%). Графики $\Delta C(\phi)$, имеющие характерную колоколообразную форму, находятся в полном согласии с экспериментами [14]. На рис. 5 представлены экспериментальные поля концентрации сульфата натрия в воде в разные моменты времени. Опыты проводились для следующих параметров: толщина слоя — $d = 2$ мм, длина — $L = 30$ мм, средняя концентрация — $\langle C \rangle = 0.16$, числа Прандтля

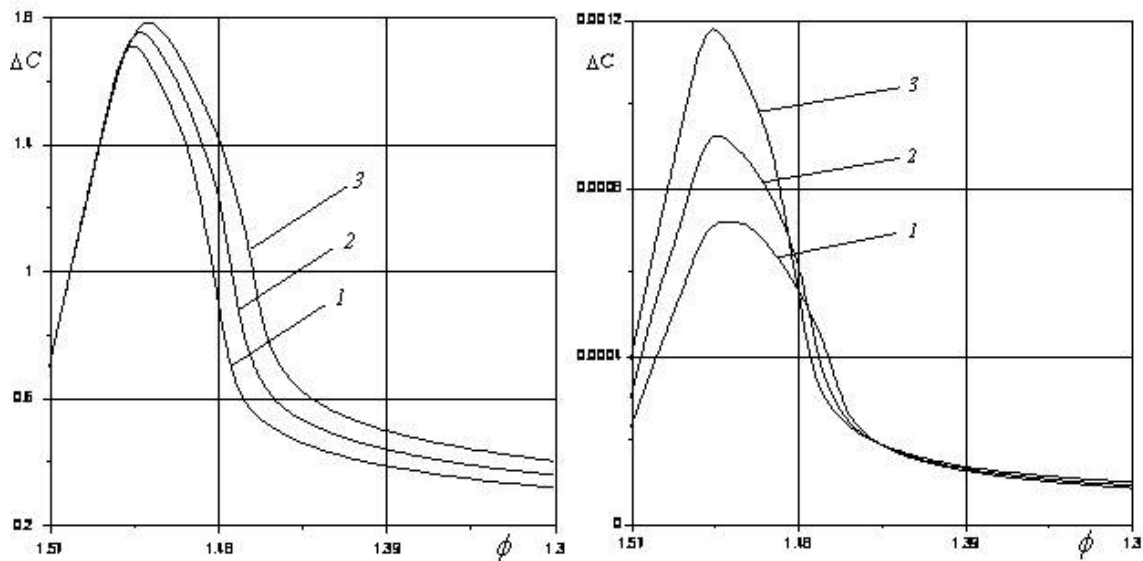


Рис. 4. Разность концентраций между угловыми точками полости; а) 1 — $Ra = 90$, 2 — $Ra = 120$, 3 — $Ra = 160$. Расчет соответствует набору параметров $Pr = 7$, $\varepsilon = 0.4$, $Sc = 10^3$.

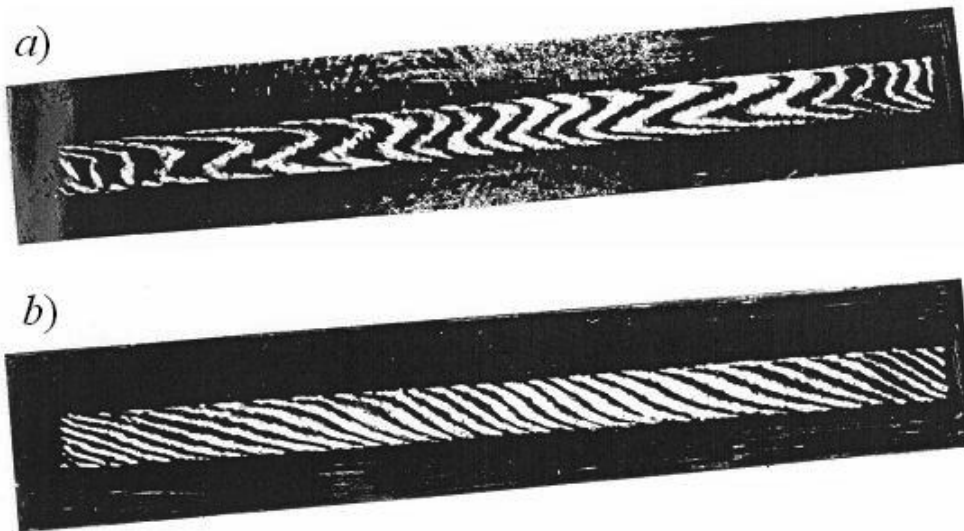


Рис. 5. Интерферограммы поля концентрации в разные моменты времени (взяты из [14] с разрешения автора К.Г. Костарева); а) — $t = 12$ мин, б) — $t = 78$ мин.

и Шмидта, соответственно — $Pr = 7$, $Sc = 10^3$, термодиффузионный параметр — $\epsilon = 2.6$, число Грасгофа — $Gr = 24$, угол наклона слоя — $\phi \approx 86^\circ$.

Расчеты правильно отражают наклон изолиний концентрации относительно границ слоя на фоне стационарного циркуляционного течения в полости при всех углах. Некоторое расхождение расчетных изолиний концентрации с экспериментальными связано со спецификой краевых условий на длинных гранях полости. В расчетах эти грани для простоты считались идеально теплопроводными, в результате примесь заметно сильнее «налипает» на стенки вследствие термодиффузии, нежели это наблюдалось в эксперименте. В опытах теплообменники хоть и изготавливаются из материалов высокой теплопроводности, тем не менее, их теплопроводность далека от идеальной.

Заключение

Таким образом, все главные результаты экспериментальной работы [14], касающиеся тепловой конвекции жидких бинарных смесей с положительной термодиффузией в неоднородно нагретом замкнутом наклонном слое, обнаруживают хорошее согласие с результатами численного моделирования. Этот вывод справедлив в отношении 1) установления только одновихревого стационарного течения при умеренных значениях числа Рэлея; 2) линейного поля температуры с изотермами параллельными широким граням, практически не искаженными течением; 3) картины искривления изолиний концентрации примеси на переходных стадиях; 4) распределения компонентов в установившемся режиме и графиков максимумов разности концентраций в зависимости от угла

наклона слоя. Результаты расчетов показывают возможность создания еще одной независимой методики измерения термодиффузионных коэффициентов и разработки эффективной и простой технологии разделения жидких и газообразных молекулярных смесей на компоненты.

Автор благодарит Костарева К.Г. за привлечение внимания к проблеме, поддержку работы и плодотворное обсуждение полученных результатов.

Работа поддержана грантом РФФИ «Конвективные процессы в зоне смешивания встречных потоков реагирующих жидкостей». Код проекта 13-01-00508а.

Литература

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. — М.: Наука, 1989.
2. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. — М.: Наука, 1972.
3. Shevtsova V.M., Melnikov D.E., Legros J.C. // *Physical Review E*. 2006. V. 73. P. 047302
4. Ryzhkov I., Shevtsova V.M. // *Physics of Fluids*. 2007. V. 19. P. 027101
5. Sechenyh V., Legros J.C., Shevtsova V. // *J. of Chemical and Engineering Data*. 2012. V. 57. P. 1036.
6. Haugen K.B., Firoozabadi A. // *J. of Chemical Physics*. 2006. V. 124. P. 054502
7. Глухов А.Ф., Демин В.А., Путин Г.Ф. // *Письма в ЖТФ*. 2008/ Т. 34. Вып. 17. 2008. С. 45.
8. Глухов А.Ф., Демин В.А., Путин Г.Ф. // *Прикладная механика и техническая физика*. 2009. Т. 50. № 1. С. 68

9. Глухов А.Ф., Демин В.А., Путин Г.Ф. // Изв. РАН, Механика жидкости и газа. 2007. № 2. С. 13.

10. Пинягин А.Ю., Пшеничников А.Ф. / Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа. 1979. № 4. С. 176

11. Костарев К.Г., Пшеничников А.Ф. // Прикладная механика и техническая физика, 1986. С. 73

12. Шапошников И.Г. // ПММ. 1953.Т. 17. Вып. 5. С. 604.

13. Тарунин Е. Л. Вычислительный эксперимент в задачах свободной конвекции.— Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1990.

14. Костарев К.Г. Концентрационная конвекция жидких смесей в замкнутых полостях // Канд. диссерт., Перм. ун-т, Пермь, 1992.

Convective separators

V.A. Demin

Perm State University
15 Bukirev str., Perm, 614990, Russia
E-mail: demin@psu.ru

The process of binary liquid mixtures division into components in an inclined layer with rigid boundaries has been investigated theoretically by the method of direct numerical simulation. It is supposed that the layer is heated from above and has the boundaries of high thermal conductivity. The molecular mixtures with positive thermodiffusion are considered. The values of Rayleigh number and angle inclination are determined which correspond to the configuration for most effective process of admixture segregation. The joint action of thermodiffusion and convection on components transfer has been examined. Experimental data, which were received earlier by means of interference technique, are in a good agreement with presented numerical results.

PACS: 02.70.— c

Keywords: numerical simulation, fluid binary mixture, separation

Bibliography — 14 references

Received October 10, 2013