

УДК 532.5.013.4, 532.5.032
PACS 47.20.-k

О механизме неустойчивости в двухслойной системе с ограниченной растворимостью КОМПОНЕНТ

А. И. Мизев, Е. А. Мошева, В. О. Ощепков

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Академика Королёва, 1
email: alex_mizev@icmm.ru

Двухслойная система смешивающихся жидкостей является распространенной модельной ситуацией при исследованиях как фундаментальных, так и прикладных проблем в гидродинамике, связанных со стратифицированными средами. Неустойчивости Рэлея-Тейлора или двойной диффузии могут приводить к нарушению механического равновесия, если оба или хотя бы один из компонентов, растворенных в каждом из слоев, изначально неустойчиво стратифицированы. Ситуация, когда оба компонента имеют устойчивое начальное распределение плотности, считается абсолютно устойчивой и, обычно, не рассматривается исследователями. В настоящей статье экспериментально продемонстрирована возможность развития неустойчивости в таких системах и предложен физический механизм, основанный на зависимости растворимости одного из компонентов от концентрации второго. Показано, что эволюция профиля плотности, возможность развития неустойчивости и свойства возникающего конвективного движения определяются начальным положением системы на плоскости параметров диаграммы растворимости.

Ключевые слова: двухслойная система; частичная растворимость; гидродинамическая неустойчивость; диффузия

Поступила в редакцию 02.10.2020; принята к опубликованию 06.11.2020

On the mechanism of instability in a two-layer system with limited solubility of components

A. I. Mizev, E. A. Mosheva, V. O. Oshchepkov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS
Ak. Koroleva St. 1, 614013, Perm
email: alex_mizev@icmm.ru

A two-layer system of miscible liquids is a common model system in studies of both fundamental and applied problems in hydrodynamics that associated with stratified media. Rayleigh-Taylor instabilities or double diffusive one can lead to a disturbance in mechanical equilibrium if both or at least one of the components dissolved in each of the layers are initially unstable stratified. The situation when both components have a stable initial density distribution is believed that absolutely stable and, usually, is not considered by researchers. This paper experimentally demonstrates the possibility of developing instability in such systems and proposes a physical mechanism based on the dependence of the solubility of one of the components on the concentration of the second component. It is shown that the evolution of the density profile, the possibility of the development of instability, and the properties of the arising convective motion are determined by the initial position of the system on the parameters plane of the solubility diagram.

Keywords: two-layer systems; limited solubility; hydrodynamic instability; diffusion;

Received 02.10.2020; accepted 06.11.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-43-50

1. Введение

Молекулярный механизм переноса тепла или массы за счет диффузии играет важную роль в вопросах устойчивости и формирования конвективных течений в механике жидкости и газа. Роль диффузионных процессов не всегда однозначна и может кардинально меняться в зависимости от исследуемой системы. В однокомпонентных растворах, когда вариации плотности среды обусловлены неоднородным распределением какой-либо одной скалярной величины, температуры или концентрации одного растворенного вещества, диффузия выступает в роли стабилизирующего фактора. Так, например, в тепловой или концентрационной задаче Рэлея диффузионные процессы приводят к затуханию возмущений в подпороговой области и ограничению скорости их роста при величине числа Рэлея выше критического.

В задачах о тепловом или концентрационном вытеснении (интрузии) [1–4] диффузионные процессы не только играют роль стабилизирующего фактора, способного подавить развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора в пристеночных областях, но и определяют пространственную частоту наиболее опасных возмущений, развивающихся в пороге неустойчивости. В [4] было показано, что длина волны вторичного течения определяется величиной числа Пекле, показывающего относительный вклад диффузионного и конвективного механизмов в массоперенос.

Иная, в отношении роли диффузии, ситуация возникает, если плотность среды определяется одновременно двумя скалярными величинами, температурой и концентрацией растворенного вещества или, если речь идет о бинарной смеси в изотермической среде, концентрацией двух растворенных веществ. В такой ситуации наличие устойчивой результирующей стратификации в жидкой среде, созданной двумя противоположно направленными градиентами плотности, не является гарантией устойчивости, если компоненты демонстрируют различную по величине скорость диффузии. Эволюция вертикального профиля плотности и структура возникающего течения зависят от того, большей или меньшей диффузией обладает неустойчиво стратифицированный компонент по отношению к устойчиво стратифицированному. В первом случае неустойчивость формируется по обе стороны от зоны смешения, тогда как сама она остается устойчивой. Диффузия обоих компонент через зону смешения приводит к

формированию конвективного движения выше и ниже зоны, что и дало название такому типу неустойчивости – конвекция с диффузионным слоем (Diffusive Layer Convection, DLC). Во втором случае развивается неустойчивость в виде солевых пальцев, распространяющихся вертикально в двух встречных направлениях сквозь зону смешения. Данный тип движения получил название конвекции двойной диффузии (double diffusion, DD). В целом, такой класс течений получил название неустойчивости двойной (или дифференциальной) диффузии [5, 6]. Интерес исследователей к данной тематике продиктован, в первую очередь, важной ролью указанных явлений во многих природных [7] и технологических системах [8].

Здесь необходимо отдельно отметить кажущееся противоречие, возникающее при первом ознакомлении с явлением двойной диффузии. Действительно, возникновение течения жидкости при начальном устойчивом распределении плотности раствора, на первый взгляд, противоречит закону сохранения энергии, поскольку остается непонятным источник энергии движения в изначально устойчивой замкнутой системе. На самом деле источником движения является неустойчивая стратификация одного из компонентов. Взаимная диффузия обоих компонентов приводит к пространственному перераспределению растворенных веществ и, как следствие, высвобождению потенциальной энергии, запасенной таким компонентом, которая конвертируется в энергию движущейся жидкости.

Ситуация, когда плотность индивидуальных растворов обоих компонент растет в направлении гравитации, считается абсолютно устойчивой и не рассматривается в рамках теории неустойчивости двойной диффузии. Действительно, поскольку числа Рэлея, связанные с каждым из компонентов, отрицательные, то отсутствует потенциальный источник энергии движения в замкнутой системе. Пространственное перераспределение компонентов в таком случае не в состоянии создать локальные минимумы или максимумы на профиле плотности, который остается монотонным.

В настоящей статье экспериментально исследуется двухслойная устойчиво стратифицированная система смешивающихся жидкостей, индивидуальное распределение плотности растворенных компонент которой также устойчиво. Мы показываем, что при наличии зависимости растворимости одной из компонент от концентрации второй взаимная диффузия веществ может приводить к формированию локального максимума на профиле

плотности и, как следствие, развитию гидродинамической неустойчивости. Обсуждается механизм неустойчивости и характеристики возникающего конвективного течения.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

Эксперименты проводились в вертикальной ячейке Хеле–Шоу, образованной двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами, разделенными стеклянным вкладышем, который задавал внутренние размеры полости: ширина $b = 5.0$ см, высота $a = 10.0$ см, толщина $h = 0.12$ см (рис. 1). Перед началом эксперимента в полости формировалась двухслойная система с изначально устойчивой стратификацией, что исключало развитие неустойчивости Рэля–Тейлора.

Приготовление растворов осуществлялось при использовании бидистиллированной воды путём взвешивания каждого компонента на электронных весах (точность 0.01 г). Точность концентрации полученных растворов контролировалась перед каждым экспериментом путем измерения их плотности (Sigma 701, KSV Instruments Ltd.) и последующего сравнения с имеющимися в литературе данными о концентрационной зависимости плотности.

Верхний слой системы формировался водным раствором этилового (C_2H_5OH) или изопропилового (C_3H_7OH) спирта, нижний – водным раствором сульфата натрия (Na_2SO_4). Поскольку распределения плотности в обоих индивидуальных растворах устойчивы, это исключало развитие неустойчивости двойной диффузии. До начала эксперимента слои были разделены тонкой горизонтальной заслонкой (рис. 1), плотно вставленной в неглубокие пазы, сделанные на половине высоты боковых границ полости. Наличие заслонки позволяло создавать в ячейке двухслойную систему смешивающихся жидкостей с тонкой горизонтальной пе-

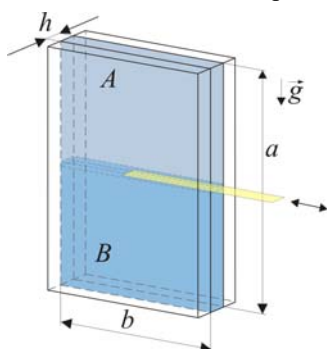


Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки Хеле-Шоу, заполненной двухслойной системой жидкостей, верхний слой которой содержит менее плотный водный раствор вещества A, нижний слой – более плотный водный раствор вещества B

реходной зоной между слоями, исключая их преждевременное диффузионное смешение.

Формирование двухслойной системы происходило следующим образом. Вначале ячейка заполнялась наполовину своего объёма более плотным раствором. Далее пространство ячейки перекрывалось заслонкой, после чего верхний объём ячейки заполнялся менее плотным раствором. После заполнения заслонка аккуратно извлекалась из ячейки, что приводило к контакту слоев и началу эксперимента.

Боковые стеклянные пластины, ограничивающие полость, формировали измерительную ячейку интерферометра Физо, собранного по автоколлимационной схеме. Использование интерферометра позволяло наблюдать в реальном времени пространственное распределение показателя преломления, вызванное неоднородностями концентрации растворенных веществ. Кроме того, эффект увлечения изолиний концентрации движущейся жидкостью, обусловленный малостью вязкого времени по сравнению с диффузионным (число Шмидта $Sc \sim 10^3$), позволял также использовать интерферограммы для наблюдений за структурой конвективного течения и измерения скорости движения жидкости. Временная эволюция интерферограмм регистрировалась при помощи видеокамеры Basler-700 с высоким пространственно-временным разрешением.

Все эксперименты проводились при температуре (23 ± 1) °C.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена серия интерферограмм, полученных в эксперименте с растворами изопропилового спирта $C_a = 40\%$ и сульфата натрия $C_s = 12.8\%$ в разные моменты времени после начала эксперимента. Сразу после контакта слоев происходит формирование переходного диффузионного слоя, расширяющегося со временем. Спустя несколько секунд после начала эксперимента в нижней части диффузионной зоны развивается неустойчивость, приводящая к формированию системы плюмов, распространяющихся вертикально вниз.

Такая несимметричная конвективная структура пальчикового типа характерна для неустойчивости Рэля-Тейлора, возникающей при формировании локального экстремума на вертикальном профиле плотности. Как говорилось выше, появление глобальной неустойчивости Рэля-Тейлора или двойной диффузии исключено в силу специфической постановки задачи. Кроме того, для таких типов неустойчивости характерно формирование симметричных структур, развивающихся как в нижнем, так и в верхнем слоях.

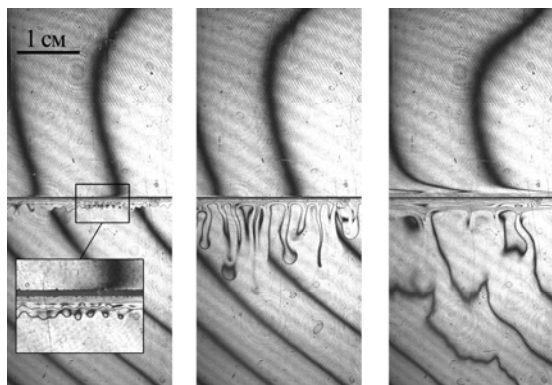
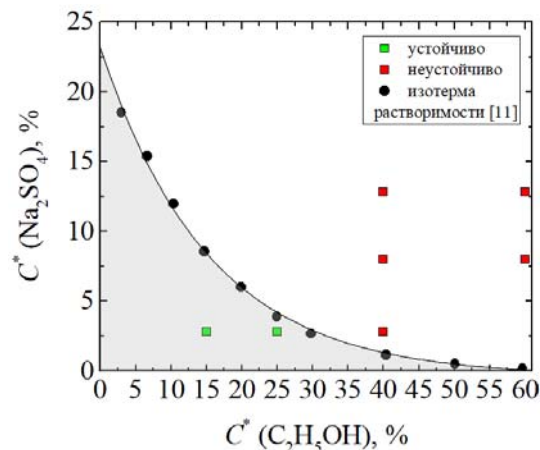


Рис. 2. Серия интерферограмм, демонстрирующая эволюцию неустойчивости, обусловленной предельной растворимостью, в системе изопропиловый спирт с массовой концентрацией $C_a = 16\%$ – сульфат натрия с массовой концентрацией $C_s = 12.8\%$. Время от начала эксперимента слева направо t , с: 15, 85, 1300

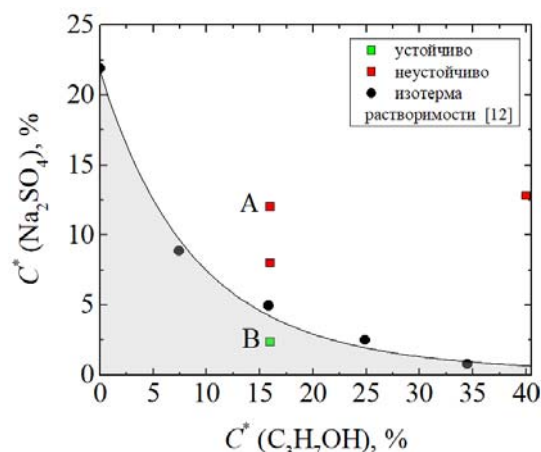
Одним из возможных объяснений могут являться контракционные эффекты. Контракцией называется явление уменьшения удельного объема смеси при смешении двух или более компонент. Физической причиной является изменение пространственной компоновки молекул смеси при изменении молярных долей, в результате чего зависимость удельного объема смеси от концентрации демонстрирует нелинейный характер. В научной литературе известны примеры развития неустойчивости, обусловленной этим явлением. Так, например, в работах [9–11] неустойчивость Рэлея-Тейлора развивалась в изначально устойчиво стратифицированной двухслойной системе при диффузии смеси метанола и этиленгликоля в слой воды.

В другой работе [12] подобные структуры наблюдались при диффузии пропиленгликоля в слой воды. Аналогичные эффекты обнаружены и в несмешивающихся системах. Авторы работ [13, 14] объясняют формирование конвективного движения контракционными эффектами, возникающими при диффузии уксусной кислоты через межфазную границу. Для всех перечисленных в указанных выше исследованиях смесей характерно наличие максимума на зависимости плотности смеси от концентрации растворенного вещества. То есть раствор некоторой концентрации обладает большей плотностью, чем каждый из компонентов смеси в отдельности. В такой ситуации смесь в пределах диффузионной зоны смешения может, в зависимости от начальных концентраций в слоях двухслойной системы, оказаться выше, что и обуславливает формирование локального максимума на профиле плотности и, как следствие, развитие неустойчивости Рэлея-Тейлора. Однако в рассмат-

риваемом нами случае контракционные эффекты не могут объяснить формирование наблюдаемого конвективного движения. Дело в том, что зависимость плотности одноатомных спиртов, применяемых нами в исследовании, является нелинейной, но монотонной, т.е. не имеет экстремума на зависимости.



(a)



(б)

Рис. 3. Изотерма растворимости, разграничивающая области полной растворимости (серый цвет) и нерастворимости (белый цвет) для тройной смеси: а – $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} - \text{H}_2\text{O}$ [11]; б – $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{C}_3\text{H}_7\text{OH} - \text{H}_2\text{O}$ [12]. Точками на графике обозначены экспериментальные реализации. Буквами А и В обозначены экспериментальные реализации, представленные на рис. 2 и рис. 4 соответственно

По нашему мнению, причиной наблюдаемой неустойчивости являются эффекты, связанные с наличием предельной растворимости веществ в тройной смеси. Соли, относящиеся к классу электролитов, при растворении диссоциируют на ионы, которые, в свою очередь, связывают часть свободных молекул воды в виде гидратных оболочек. При росте концентрации электролита умень-

шается количество свободной воды, что, в конечном итоге, приводит к наступлению предела растворимости. При добавлении в раствор спиртов, как одноатомных, так и многоатомных, часть молекул воды оказывается связанной их молекулами, что неизбежно ведет к уменьшению растворимости соли. На рис. 3 представлены так называемые изотермы растворимости, т.е. зависимости предельной растворимости сульфата натрия в тройной смеси с водой и этиловым (рис. 3, а) или изопропиловым (рис. 3, б) спиртом, полученные при фиксированной температуре [15, 16]. Ниже кривой расположена область полной взаимной растворимости компонентов тройной смеси (области, обозначенные серым цветом на рис. 3), выше кривой – область нерастворимости соли. Видно, что в обеих тройных смесях увеличение концентрации спирта от 0 до 40% снижает растворимость соли на порядки.

Исходя из представленных выше зависимостей, можно предложить следующий механизм развития неустойчивости. В начальный момент времени вещества в слоях расположены в индивидуальных растворах, и концентрация соли далека от предельной. После контакта слоев диффузионные процессы формируют переходный слой, который представляет собой тройную смесь из воды, соли и спирта. Дальнейшая эволюция системы в значительной мере зависит от положения системы на диаграмме растворимости. Если точка, описывающая положение системы, находится выше изотермы растворимости, то тройная смесь оказывается перенасыщенной по отношению к соли. Это обуславливает вытеснение части лишней соли в нижнюю часть диффузионной зоны с меньшей концентрацией спирта. В результате там формируется область с повышенной, по отношению к нижнему слою, концентрацией соли. Поскольку коэффициент расширения соли больше единицы, то плотность такого подслоя оказывается выше плотности нижнего слоя, что ведет к развитию неустойчивости Рэлея-Тейлора. Если точка, описывающая положение системы, находится ниже изотермы растворимости, то тройная смесь в переходной зоне остается ненасыщенной, и вещества свободно проникают друг в друга за счет диффузии. Профиль плотности при этом остается устойчивым. Точка А на рис. 3, б описывает положение системы, результаты исследования которой приведены на рис. 2. Видно, что исследуемая ситуация относится к первой из описанных выше, что может свидетельствовать в пользу предложенного выше механизма неустойчивости.

Для проверки данной гипотезы были проведены эксперименты в двухслойной системе, сформированной растворами с концентрациями, соответствующими точке на диаграмме, лежащей ниже изотермы растворимости (точка В на рис. 3, б). На

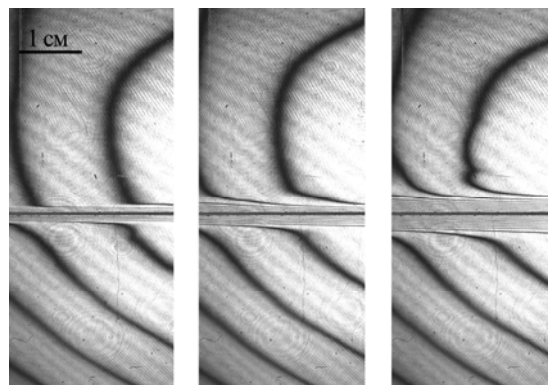


Рис. 4. Серия интерферограмм, демонстрирующая эволюцию процесса диффузии в системе изопропиловый спирт с массовой концентрацией $C_a = 16\%$ – сульфат натрия с массовой концентрацией $C_s = 2.35\%$. Время от начала эксперимента слева направо t , с: 55, 200, 660

рис. 4 представлена серия интерферограмм, полученных в эксперименте с растворами изопропилового спирта $C_a = 16\%$ и сульфата натрия $C_s = 2.35\%$ в разные моменты времени после начала эксперимента. Видно, что, в отличие от экспериментов, результаты которых приведены на рис. 2, двухслойная система остается устойчивой в течение всего времени проведения эксперимента, что свидетельствует в пользу предложенного механизма неустойчивости.

В целях дополнительной проверки предложенного механизма были проведены эксперименты с другими начальными концентрациями, а также с другой парой растворенных веществ: этиловый спирт и сульфат натрия. Параметры всех экспериментов, где наблюдалось развитие неустойчивости, отмечены точками красного цвета на диаграммах растворимости, приведенных на рис. 3. Точками зеленого цвета на этих же диаграммах отмечены эксперименты, в которых двухслойная система оставалась устойчивой. Расположение точек, соответствующих устойчивой и неустойчивой ситуациям, по разные стороны от изотермы растворимости служит убедительным свидетельством в пользу предложенного механизма неустойчивости.

В ходе проведения экспериментов с различными начальными концентрациями растворенных веществ обнаружено, что время формирования неустойчивости и интенсивность возникающего течения зависят от удаленности точки на диаграмме от изотермы растворимости. В качестве меры интенсивности движения жидкости использована временная эволюция вертикальной координаты плюмов, осредненной по ансамблю.

На рис. 5 представлены такие зависимости для трех различных концентраций соли при фиксированной концентрации этилового спирта. Видно,

что, по мере удаления точки, описывающей положение системы на диаграмме, от изотермы растворимости скорость движения плюмов, и, следовательно, интенсивность конвективного движения, становится больше. При этом время зарождения t_3 быстро уменьшается. Данные наблюдения являются дополнительным подтверждением справедливости предложенного в статье физического механизма. Действительно, чем дальше от изотермы находится точка, тем больший перепад плотности формируется ниже зоны смещения и тем, соответственно, больше скорость конвективного движения и меньше время, необходимое для его развития.

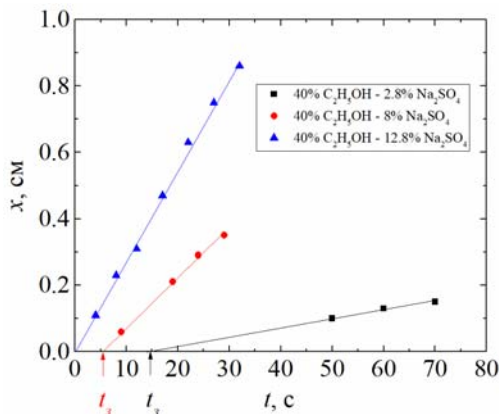


Рис. 5. Зависимость скорости распространения пальчиковой структуры от времени для системы этиловый спирт – сульфат натрия

4. Заключение

Изложенные в статье результаты представляют интерес по следующим причинам. С одной стороны, показано, что даже в ситуации, которая, на первый взгляд, выглядит абсолютно устойчивой с точки зрения механического равновесия возможно наличие механизмов, приводящих к развитию гидродинамической неустойчивости. Предварительный обзор литературы показывает, что такой механизм формирования конвективного движения не рассматривался до сих пор исследователями. Необходимо заметить, что обнаруженное явление не является каким-то частным случаем, характерным для выбранной пары веществ. Аналогичная неустойчивость была нами обнаружена для множества других пар, состоявших из спиртов или ацетона, с одной стороны и различных солей или щелочей, с другой стороны. Однако, ввиду того, что нами не были найдены в литературе диаграммы растворимости для этих пар, мы приняли решение пока не включать данные результаты, поскольку неясно, к какому типу следует отнести обнаруженную неустойчивость. Она точно не относится к семейству неустойчивостей двойной диффузии, так как эффект никак не зависит от со-

отношения коэффициентов диффузии растворенных веществ. Картина течения одинакова для случаев величины этого отношения, которая может быть как больше, так и меньше единицы. Диффузия здесь играет второстепенную роль, обеспечивая формирование зоны тройной смеси. Возможно, будущие исследования помогут в классификации данного явления.

С другой стороны, полученные результаты интересны, как явная аналогия процессов, имеющих место в методе зонной плавки, применяемой для очистки полупроводниковых материалов. Указанный метод заключается в создании движущейся вдоль кристаллического образца локальной зоны расплава. Эффект основан на разности растворимостей примеси в жидкой и твердой фазах. Если отношение концентраций примеси в твердой и жидкой фазах меньше единицы, то перед движущимся фронтом кристаллизации будет скапливаться слой с повышенной концентрацией примеси, в то время как в кристаллической фазе ее концентрация будет меньше. Данный способ с успехом применяется уже более 70 лет для тонкой очистки множества материалов. В рассматриваемой в статье ситуации роль фронта кристаллизации играет диффузионный фронт верхнего вещества. Указанная аналогия между процессами позволяет использовать обнаруженное в статье явление для моделирования процессов зонной плавки.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-01-00621.

Список литературы

1. Schöpf W., Stiller O. Three-dimensional patterns in a transient, stratified intrusion flow // *Physical Review Letters*. 1997. Vol. 79. P. 4373. DOI: 10.1103/PhysRevLett.79.4373
2. Norris S. E. Rayleigh-Bénard roll formation in a thermal intrusion // *Proceedings of the 18th Australasian Fluid Mechanics Conference*. 2012. P. 206–209.
3. Демин В. А., Костарев К. Г., Мизев А. И., Мошева Е. А., Попов Е. А. О конвективной неустойчивости встречных потоков двух взаиморастворимых жидкостей // *Нелинейная динамика*. 2014. Т. 10. № 2. С. 195–208.
4. Mizev A., Mosheva E., Kostarev K., Demin V., Popov E. Stability of solutal advective flow in a horizontal shallow layer // *Physical Review Fluids*. 2017. Vol. 2 (10), 103903. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.103903
5. Turner J. S. Buoyancy effects in fluids. Cambridge, UK: Cambridge university press, 1979. 412 p.
6. Radko T.A. Double-diffusive convection. Cambridge, UK: Cambridge university press, 2013. 344 p.

7. Kunze E. A. Review of oceanic salt-fingering theory // *Progress in Oceanography*. 2003. Vol. 56. N. 3–4. P. 399–417. DOI: 10.1016/S0079-6611(03)00027-2
8. Maruyama S., Tsubaki K., Taira K., Sakai S. Artificial upwelling of deep seawater using the perpetual salt fountain for cultivation of ocean desert // *Journal of Oceanography*. 2004. Vol. 60. P. 563–568. DOI: 10.1023/B:JOCE.0000038349.56399.09
9. Neufeld J. A., Hesse M. A., Riaz A., Hallworth M. A., Tchelepi H. A., Huppert, H. E. Convective dissolution of carbon dioxide in saline aquifers // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37. N. 22. P. 1–5. DOI: 10.1029/2010GL044728
10. MacMinn C. W., Neufeld J. A., Hesse M. A., Huppert H. E. Spreading and convective dissolution of carbon dioxide in vertically confined, horizontal aquifers // *Water Resources Research*. 2012. Vol. 48. N. 11. P. 1–11. DOI: 10.1029/2012WR012286
11. Jafari Raad S. M., Emami-Meybodi H., Hassanzadeh H. On the choice of analogue fluids in CO₂ convective dissolution experiments // *Water Resources Research*. 2016. Vol. 52. N. 6. P. 4458–4468. DOI: 10.1002/2015WR018040
12. Backhaus S., Turitsyn K., Ecke R. E. Convective instability and mass transport of diffusion layers in a Hele-Shaw geometry // *Physical Review Letters*. 2011. Vol. 106. N. 10, 104501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.104501
13. Birikh R. V., Denisova M. O., Kostarev K. G. Modeling of the Marangoni Instability of uniform diffusion through an interface in weightlessness conditions // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019. Vol. 60. N. 7. P. 1264–1277. DOI: 10.1134/S0021894419070034
14. Kostarev K. G., Torokhova S. V. Instability of the Interface Due to Surfactant Diffusion in the System of Immiscible Liquids // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32. P. 507–512. DOI: 10.1007/s12217-020-09787-y
15. Vener R. E., Thompson A. R. Solubility and density isotherms-sodium sulfate-ethyl alcohol-water // *Industrial and Engineering Chemistry*. 1950. Vol. 42. N. 1. P. 171–174. DOI: 10.1021/ie50481a044
16. Борисов И. М., Набиев А. А. Константы электролитической диссоциации сульфатов лития, натрия и калия в водно-изопропанольных растворах // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2020. Т. 63. №. 3. DOI: 10.6060/ivkkt.20206303.6123
17. Kunze E. A. Review of oceanic salt-fingering theory. *Review Letters*. 1997, vol. 79, pp. 4373. DOI: 10.1103/PhysRevLett.79.4373
18. Norris S. E. Rayleigh-Bénard roll formation in a thermal intrusion. *Proceedings of the 18th Australasian Fluid Mechanics Conference*. 2012. pp. 206–209
19. Demin V. A., Kostarev K. G., Mizev A. I., Mosheva E. A., Popov E. A. On convective instability of the counter propagating fluxes of inter-soluble liquids. *Nelineinaya Dinamika [Russian Journal of Nonlinear Dynamics]*. 2014, vol. 10. no 2, pp. 195–208
20. Mizev A., Mosheva E., Kostarev K., Demin V., Popov E. Stability of solutal advective flow in a horizontal shallow layer. *Physical Review Fluids*. 2017, vol. 2 (10), 103903. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.103903
21. Turner J. S. *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge, UK: Cambridge university press. 1979. 412 p.
22. Radko T. A. *Double-diffusive convection*. Cambridge, UK: Cambridge university press. 2013, 344 p.
23. Kunze E. A. Review of oceanic salt-fingering theory. *Progress in Oceanography*. 2003, vol. 56, no. 3–4, pp. 399–417. DOI: 10.1016/S0079-6611(03)00027-2
24. Maruyama S., Tsubaki K., Taira K., Sakai S. Artificial upwelling of deep seawater using the perpetual salt fountain for cultivation of ocean desert. *Journal of Oceanography*. 2004, vol. 60, pp. 563–568. DOI: 10.1023/B:JOCE.0000038349.56399.09
25. Neufeld J. A., Hesse M. A., Riaz A., Hallworth M. A., Tchelepi H. A., Huppert H. E. Convective dissolution of carbon dioxide in saline aquifers. *Geophysical research letters*. 2010, vol. 37, no. 22, pp. 1–5. DOI: 10.1029/2010GL044728
26. MacMinn C. W., Neufeld J. A., Hesse M. A., Huppert H. E. Spreading and convective dissolution of carbon dioxide in vertically confined, horizontal aquifers. *Water Resources Research*. 2012, vol. 48, no. 11, pp. 1–11. DOI: 10.1029/2012WR012286
27. Jafari Raad S. M., Emami-Meybodi H., Hassanzadeh H. On the choice of analogue fluids in CO₂ convective dissolution experiments. *Water Resources Research*. 2016, vol. 52, no. 6, pp. 4458–4468. DOI: 10.1002/2015WR018040
28. Backhaus S., Turitsyn K., Ecke R. E. Convective instability and mass transport of diffusion layers in a Hele-Shaw geometry. *Physical Review Letters*. 2011, vol. 106, no. 10, 104501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.104501
29. Birikh R. V., Denisova M. O., Kostarev K. G. Modeling of the Marangoni instability of uniform diffusion through an interface in weightlessness conditions. *Journal of Applied Mechanics and*

References

1. Schöpf W., Stiller O. Three-dimensional patterns in a transient, stratified intrusion flow. *Physical*

- Technical Physics*. 2019, vol. 60, no. 7, pp. 1264–1277. DOI: 10.1134/S0021894419070034
14. Kostarev K. G., Torokhova S. V. Instability of the interface due to surfactant diffusion in the system of immiscible liquids. *Microgravity Science and Technology*. 2020, vol. 32, pp. 507–512. DOI: 10.1007/s12217-020-09787-y
15. Vener R. E., Thompson A. R. Solubility and density isotherms-sodium sulfate-ethyl alcohol-water. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1950. vol. 42, no. 1, pp. 171–174. DOI: 10.1021/ie50481a044
16. Borisov I. M., Nabiev A. A. Constants of electrolytic dissociation of the lithium, sodium and potassium sulfates in aqueous isopropanol solutions. *Russ. J. Chem. Chem. Tech.* 2020, vol. 63, no. 3, pp. 16–22. DOI: 10.6060/ivkkt.20206303.6123

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Мизев А. И., Мошева Е. А., Ощепков В. О. О механизме неустойчивости в двухслойной системе с ограниченной растворимостью компонент // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 4. С. 43–50. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-43-50

Please cite this article in English as:

A. I. Mizev, E. A. Mosheva, V. O. Oshchepkov. On the mechanism of instability in a two-layer system with limited solubility of components. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2020, no. 4, pp. 43–50. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-43-50