

УДК 532.5.013.4, 532.5.032
PACS 47.20.-k

Неустойчивость двойной диффузии при сонаправленной диффузии растворенных компонент

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

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614990, Пермь, ул. Академика Королёва, 1
email: alex_mizev@icmm.ru

Диффузия может оказывать дестабилизирующее влияние на развитие конвективных течений в многокомпонентных жидких смесях с разной скоростью диффузии компонент. Возникающее при этом движение, называемое в общем случае неустойчивостью двойной (или дифференциальной) диффузии, является важным механизмом интенсификации массо- и теплопереноса во многих природных и технологических системах. В качестве компонент, влияющих на общее распределение плотности в жидкой среде, могут выступать тепло и растворенное вещество или два растворенных вещества. В последнем, изотермическом, случае стандартная постановка задачи включает в себя изучение устойчивости двухслойной системы при встречной диффузии компонент, растворенных в соседних слоях. В статье впервые экспериментально исследована возможность развития неустойчивости при сонаправленной диффузии компонент, имеющих разный знак концентрационной зависимости плотности и изначально растворенных в одном из слоев. Такая постановка задачи наиболее приближена к ряду океанологических приложений, где развитие неустойчивости обусловлено неравномерным распределением температуры и солёности морской воды. В работе обнаружено развитие неустойчивости двойной диффузии и показано, что структура возникающего конвективного течения определяется отношениями приращений плотности, обусловленных растворением компонент, и коэффициентов диффузии. По результатам исследований предложен набор безразмерных параметров и построена карта режимов наблюдаемого конвективного течения, позволяющая систематизировать экспериментальные данные.

Ключевые слова: гравитационная конвекция; неустойчивость двойной диффузии; интерферометрия

Поступила в редакцию 10.10.2019; принята к опубликованию 29.11.2019

Double diffusive instability during codirectional diffusion of dissolved components

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

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

Diffusion can have a destabilizing effect on the development of convective flows in multicomponent liquid mixtures with different diffusion rates of components. The movement that arises in this case, which is generally called double (or differential) diffusive instability, is an important mechanism for intensifying mass and heat transfer in many natural and technological systems. As components that affect the overall density distribution in a liquid medium, heat and a dissolved substance

or two dissolved substances can act. In the latter, isothermal case, the standard formulation of the problem includes the study of the stability of a two-layer system under counter diffusion of components dissolved in adjacent layers. The possibility of developing instability during co-directional diffusion of components having a different sign of the concentration dependence of density and initially dissolved in one of the layers was experimentally investigated for the first time. Such a statement of the problem is closest to a number of oceanological applications, where the development of instability is due to the uneven distribution of temperature and salinity of sea water. In present work, the development of double diffusive instability was found and it was shown that the structure of the resulting convective flow is determined by the ratios of the density increments due to the dissolution of the components and the diffusion coefficients. Based on the research results, a set of dimensionless parameters is proposed and a map of the regimes of the observed convective flows is constructed, which allows us to systematize the experimental data.

Keywords: gravitationl convection; double diffusive instability; interferometry

Received 10.10.2019; accepted 29.11.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-60-65

1. Введение

Конвективное движение в жидкой среде играет определяющую роль в процессах переноса тепла и массы в подавляющем большинстве природных явлений и технологических процессов, от микро-масштабов до масштабов астрономических объектов. В отсутствие межфазной границы причиной возникновения движения в присутствии гравитации является неоднородность плотности жидкости, вызванная вариациями температуры или содержания растворенной в объеме примеси. Условия развития конвективной неустойчивости зависят от взаимной ориентации градиента плотности и направления силы тяжести. Если направление градиента плотности совпадает с направлением силы тяжести, то говорят об устойчивой стратификации среды, что обуславливает невозможность развития конвективного движения. Однако это справедливо в случае, когда плотность жидкой среды зависит только от какого-то одного параметра. Иная, в отношении критериев неустойчивости, ситуация наблюдается, когда плотность контролируется одновременно двумя компонентами, например, двумя растворенными веществами или растворенным веществом и теплом. В этом случае неустойчивость становится возможной даже в изначально устойчиво стратифицированной среде, если компоненты вносят разные по знаку вклады в общую стратификацию плотности и имеют различные скорости диффузионного переноса. В такой ситуации вертикальное смещение элемента жидкости не обязательно приводит к его отрицательной плавучести и возникновению возвращающей силы, что характерно для устойчиво стратифицированных однокомпонентных сред. Результат будет зависеть от протекания процессов обмена элемента жидкости с окружающей средой. При диффузии более быстрого компонента из объема элемента, в зависимости от знака его вклада в общую плотность,

плавучесть может либо поменять знак, став положительной, либо, сохраняя знак, увеличиться. В первом случае развивается неустойчивость в виде солевых пальцев (в англоязычной литературе – salt fingers), распространяющихся вертикально в двух встречных направлениях сквозь зону смешения. Такой тип движения получил название конвекции двойной диффузии (double diffusion, DD). Во втором из возможных сценариев неустойчивость формируется по обе стороны от зоны смешения, но 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). В целом, такой класс явлений называется неустойчивостью двойной (или дифференциальной) диффузии. Необходимо отметить, что единой терминологии до сих пор не сформировалось и в литературе можно встретить и иные названия.

Данное явление было впервые предсказано более пятидесяти лет назад [1] как возможный механизм вертикального перемешивания в океане, где плотность морской воды определяется одновременно распределением температуры и соли, скорость диффузии которых различается на два порядка. Было показано, что характерная для морской воды вертикальная стратификация по температуре и солёности может приводить к возникновению описанных выше сценариев неустойчивости. Результаты теоретических исследований впоследствии были подтверждены многими лабораторными и натурными экспериментами, показавшими эффективность данного конвективного механизма в вертикальном переносе тепла и массы в мировом океане [2–4]. Однако в силу сложности создания и поддержания постоянного градиента температуры вследствие неизбежных тепловых потерь эксперименты носили больше качественный характер. Позднее для лабораторных исследований

была предложена иная модельная ситуация, в которой тепло было заменено вторым растворенным веществом [5]. Несмотря на существенно меньшую разницу в скоростях диффузии, такая постановка способствовала формированию конвективного течения [6–10]. Все экспериментальные исследования были проведены только с одной парой веществ, а именно соль-сахар, которые изначально были равномерно распределены в разных слоях двухслойной системы. Поскольку в отличие от системы «соль-тепло» добавление обоих веществ увеличивает плотность раствора, то для создания начальной устойчивой стратификации градиенты концентрации в такой модели всегда разнонаправлены, а компоненты диффундируют навстречу друг другу. В связи с этим является спорным применение результатов, полученных в такой постановке, в задачах океанологии, где тепло и соль, вносящие разные по знаку вклады в приращения плотности, диффундируют в одном направлении.

Нами показана возможность проведения исследований неустойчивости двойной диффузии в системе с двумя растворенными веществами в постановке, наиболее приближенной к задачам, традиционно исследуемым в океанологии. Для этого система «соль-тепло» заменяется раствором двух компонент, имеющих разные знаки концентрационной зависимости плотности. В такой ситуации для создания изначально устойчивой стратификации градиенты концентраций обоих компонент должны быть коллинеарны. Таким образом, в статье впервые исследовано развитие неустойчивости двойной диффузии в ситуации, когда массоперенос растворенных компонент происходит в одном направлении, т.е. «наперегонки». Более того, показано, что замена «тепла» на растворенный компонент позволяет исследовать область параметров, недоступную в системе «тепло-соль», когда «тепло» диффундирует медленнее, чем «соль». По результатам исследований предложен набор безразмерных параметров и построена карта режимов наблюдаемого конвективного течения, объединяющая экспериментальные данные.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

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

Один из слоев представлял собой однородный водный раствор одновременно двух компонент, вносящих разные по знаку вклады в изменение плотности раствора при вариациях их концентрации. В качестве «легкого» компонента, с отрицательным коэффициентом концентрационной зависимости плотности, применялись одноатомные спирты (этанол, изопропанол) или ацетон. Неорганические соединения (соли, гидроксиды) или сахар, имеющие положительные коэффициенты концентрационной зависимости плотности, были использованы в растворах как «тяжелые» компоненты.

Используемые водные растворы приготавливались заранее и выстаивались при комнатной температуре на протяжении суток. Это обеспечивало полную диссоциацию всех растворенных компонент и однородность раствора.

До начала эксперимента слои были разделены тонкой горизонтальной заслонкой, плотно вставленной в неглубокие пазы, сделанные на половине высоты боковых границ полости. Боковые стеклянные пластины, ограничивающие полость, формировали измерительную ячейку интерферометра Физо, собранного по автоколлимационной схеме (рис. 1, б). Использование интерферометра позволяло наблюдать в реальном времени пространственное распределение показателя преломления, вызванное неоднородностями концентрации растворенных веществ. Кроме того, эффект увлечения

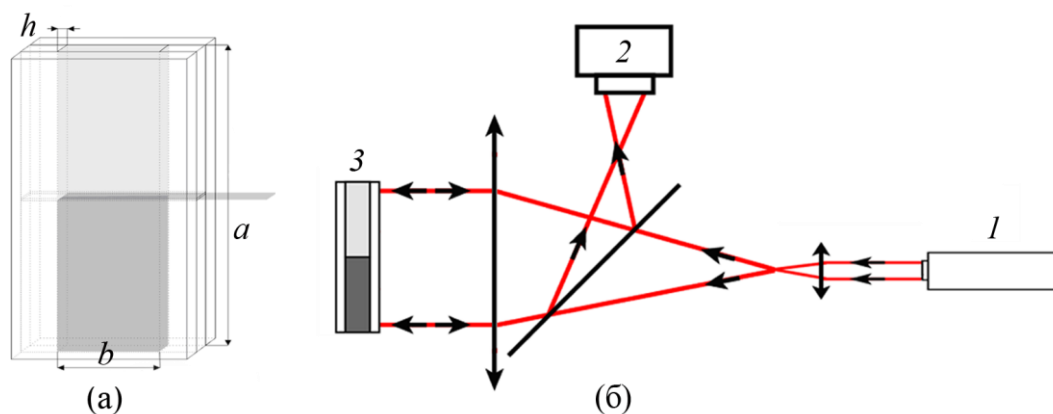


Рис. 1. Экспериментальная установка: а – схема ячейки Хеле-Шоу; б – схема интерферометра Физо: 1 – He-Ne лазер, 2 – видеочамера, 3 – ячейка Хеле-Шоу

изолиний концентрации движущейся жидкостью, обусловленный малостью вязкого времени по сравнению с диффузионным (число Шмидта $Sc \sim 10^3$), позволял также использовать интерферограммы для качественных наблюдений за структурой конвективного течения.

В ходе проведения экспериментов исследовалась устойчивость двухслойной системы и структура возникающих конвективных течений в зависимости от соотношения плотностей слоев и коэффициентов диффузии компонент. Все эксперименты были выполнены при комнатной температуре 24 ± 1 °С. Температура в комнате устанавливалась и поддерживалась постоянной с помощью системы климат-контроля.

3. Результаты

Наблюдения показали, что возможность развития неустойчивости двойной диффузии в двухслойной системе и структура возникающего конвективного течения зависят от расположения слоев и соотношения скоростей диффузии растворенных компонент. В случае если оба вещества растворены в верхнем слое и «легкий» компонент обладает большим, по отношению к «тяжелому», коэффициентом диффузии, то развивается конвекция двойной диффузии. Интерферограмма, иллюстрирующая структуру движения жидкости, представлена на рис. 2, а. Хорошо видно формирование характерного для конвекции двойной диффузии течения в виде солевых пальцев, распространяющихся через границу контакта слоев. Если же из пары веществ, растворенных в верхнем слое, большим коэффициентом диффузии обладает «тяжелый» компонент, то в двухслойной системе развивается неустойчивость в виде конвекции диффузионного слоя. Интерферограмма, иллюстрирующая пример такого типа течения, приведена на рис. 2, б. Видно развитие крупномасштабных конвективных ячеек по обе стороны от зоны контакта, которая остается устойчивой, что характерно для такого типа неустойчивости.

В случае обратного расположения слоев, т.е. когда оба вещества растворены в нижнем слое, реализуется противоположная ситуация. При более быстрой диффузии «легкого» компонента неустойчивость развивается в виде конвекции диффузионного слоя, а при обратном соотношении скоростей диффузионного переноса компонент наблюдается формирование конвекции двойной диффузии.

Результаты наблюдений могут быть обобщены в виде карты режимов конвективного течения в координатах двух безразмерных параметров. Первый из них, откладываемый по оси абсцисс, показывает отношение приращений плотности раствора за счет добавления «легкой» и «тяжелой» компонент $R_\rho = \Delta\rho_l / \Delta\rho_m$. Здесь $\Delta\rho_l = |\rho_0 - \rho_l(C)|$ и $\Delta\rho_m = |\rho_0 - \rho_m(C)|$, где ρ_0 – плотность растворителя

(воды, в рассматриваемом случае), а $\rho_l(C)$ и $\rho_m(C)$ – плотности растворов при добавлении только «легкого» или «тяжелого» компонентов, соответственно. Второй из безразмерных параметров представляет собой отношение коэффициентов диффузии «легкого» D_l и «тяжелого» D_m компонент $\delta_D = D_l / D_m$. Карта режимов течения в данных координатах приведена на рис. 3. Область значений $R_\rho > 1$ соответствует конфигурации, когда оба вещества растворены в верхнем слое, а нижний слой сформирован чистым растворителем.

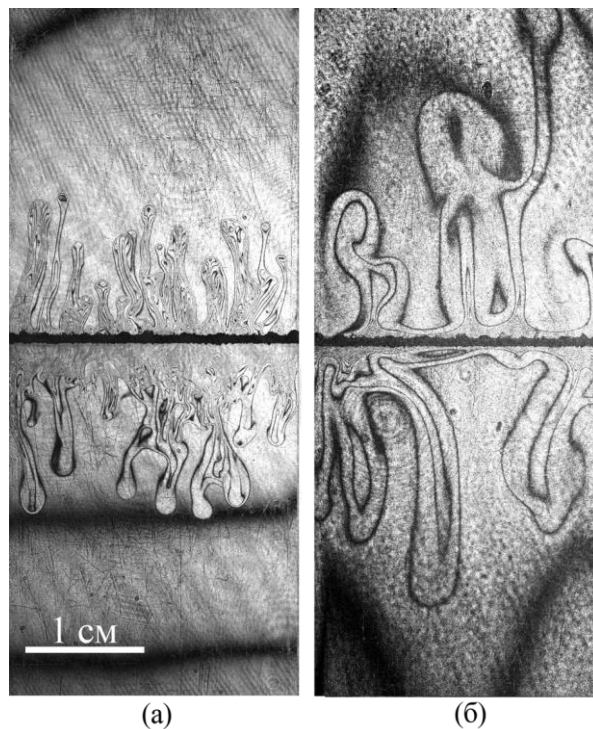


Рис. 2. Интерферограммы, демонстрирующие структуру движения жидкости в случае развития: а – конвекции двойной диффузии; б – конвекции диффузионного слоя

При $0 < R_\rho < 1$, наоборот, раствор располагается в нижнем слое, а вода – в верхнем. Область параметров $\delta_D > 1$ отвечает за ситуацию, когда большим коэффициентом диффузии в растворе обладает «легкий» компонент, а при $\delta_D < 1$ быстрее диффундирует «тяжелый» компонент. Таким образом, четыре квадранта на карте соответствуют четырем возможным к изучению в данной постановке ситуациям: (I) раствор обоих веществ расположен в нижнем слое, «легкий» диффундирует быстрее, (II) раствор обоих веществ расположен в нижнем слое, «тяжелый» диффундирует быстрее, (III) раствор обоих веществ расположен в верхнем слое, «легкий» диффундирует быстрее, (IV) раствор обоих веществ расположен в верхнем слое, «тяжелый» диффундирует быстрее. Соответственно, развитие неустойчивости двойной диффузии в виде конвекции двойной диффузии наблюдается в

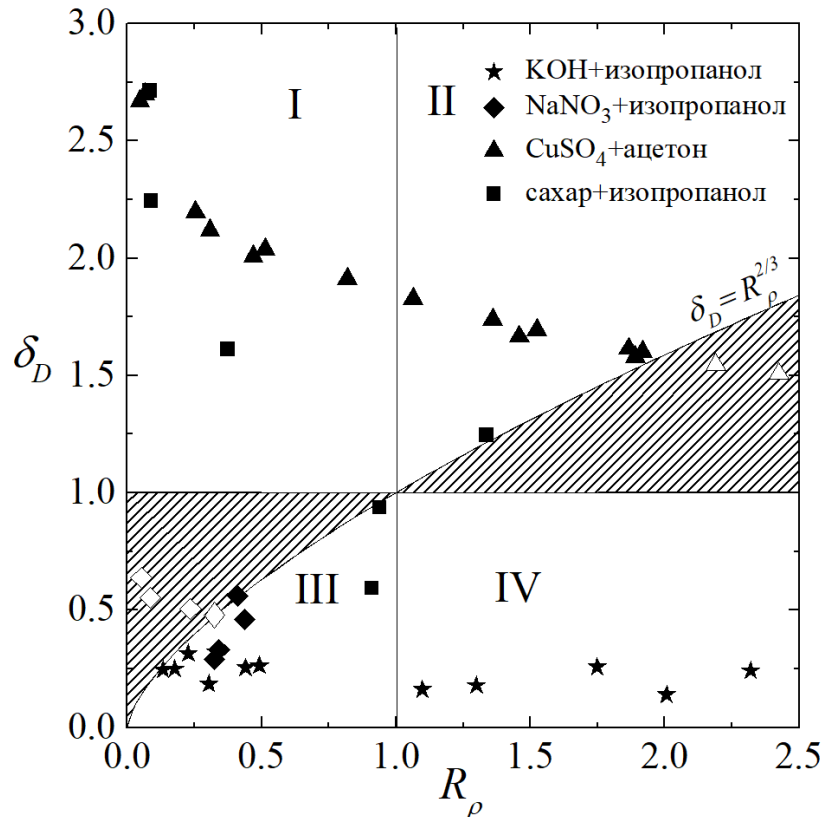


Рис. 3. Карта режимов течения. Римскими цифрами обозначены типы возникающей неустойчивости: I, II – конвекция диффузионного слоя; III, IV – конвекция двойной диффузии. Заштрихованная область параметров характеризует устойчивый случай

квадрантах (II) и (III) и в виде конвекции диффузионного слоя в квадрантах (I) и (IV).

Обнаружено, что интенсивность возникающего конвективного течения существенным образом зависит от величины параметра R_ρ . Наибольшая интенсивность течения наблюдается в области значений данного параметра, близких к единице. При удалении от оси $R_\rho = 1$ интенсивность движения быстро уменьшается. В случае конвекции двойной диффузии превышение данного параметра выше некоторого критического значения, величина которого зависит от соотношения коэффициентов диффузии, неустойчивость в двухслойной системе не развивается (заштрихованная область).

Интересно, что положение границы области устойчивости хорошо описывается зависимостью $\delta_D = R_\rho^{2/3}$, предсказанной ранее [11] в теоретическом исследовании для случая «тепло-соль» (сплошная линия на рис. 3). В случае конвекции диффузионного слоя удаление от оси $R_\rho = 1$ также приводит к быстрому убыванию интенсивности течения, но неустойчивость наблюдается при любых значениях параметров в пределах квадрантов (I) и (IV).

4. Заключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования неустойчивости в устойчиво стратифицированной двухслойной си-

стеме, содержащей два растворенных компонента с различными коэффициентами диффузии. Впервые показана возможность развития неустойчивости двойной диффузии при сонаправленной диффузии компонент, изначально растворенных в одном из слоев. В такой постановке задача не была исследована ранее ни экспериментально, ни теоретически. Предлагаемая формулировка проблемы наиболее приближена к классической постановке, применяемой в ряде океанологических приложений для исследований развития неустойчивости двойной диффузии в толще океана при неравномерном распределении температуры и солёности морской воды. Замена тепла на растворенный компонент с отрицательным коэффициентом концентрационной зависимости плотности позволяет предложить адекватную лабораторную модель для исследования указанных задач. Это подтверждается тем фактом, что обнаруженная в экспериментах граница зоны устойчивости для случая конвекции двойной диффузии хорошо описывается зависимостью, предложенной ранее в теоретическом исследовании для случая «тепло-соль». Кроме того, предложенная постановка расширяет возможности исследования, позволяя изучать области параметров, недоступные в системе «тепло-соль», когда «тепло» диффундирует медленнее, чем «соль».

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

Список литературы

1. Stern M. E. The «salt-fountain» and thermohaline convection // *Tellus*. 1960. Vol. 12. N. 2. P. 172–175. DOI: 10.3402/tellusa.v12i2.9378
2. Turner J. S. *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1979. 412 p.
3. Schmitt R. W. Observational and laboratory insights into salt finger convection // *Progress in oceanography*. 2003. Vol. 56. N. 3–4. P. 419–433. DOI: 10.1016/S0079-6611(03)00033-8
4. 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
5. Ингель Л. Х., Калашиник М. В. Нетривиальные особенности гидротермодинамики морской воды и других стратифицированных растворов // *Успехи физических наук*. 2012. Т. 182. Вып. 4. С. 379–406. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201204b.0379
6. Stern M. E., Turner J. S. Salt fingers and convecting layers // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1969. Vol. 16. N. 5. P. 497–511. DOI: 10.1016/0011-7471(69)90038-2
7. Taylor J. R., Veronis G. Experiments on double-diffusive sugar-salt fingers at high stability ratio // *Journal of Fluid Mechanics*. 1996. Vol. 321. P. 315–333. DOI: 10.1017/S0022112096007744
8. Sorkin A., Sorkin V., Leizerson I. Salt fingers in double-diffusive systems // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2002. Vol. 303. N. 1–2. P. 13–26. DOI: 10.1016/S0378-4371(01)00396-X
9. Pringle S. E., Glass R. J., Cooper C. A. Double-diffusive finger convection in a Hele-Shaw cell: an experiment exploring the evolution of concentration fields, length scales and mass transfer // *Transport in Porous Media*. 2002. Vol. 47. N. 2. P. 195–214. DOI: 10.1023/A:1015535214283
10. Trevelyan P. M., Almarcha C., De Wit A. Buoyancy-driven instabilities of miscible two-layer stratifications in porous media and Hele-Shaw cells // *Journal of Fluid Mechanics*. 2011. Vol. 670. P. 38–65. DOI: 10.1017/S0022112010005008
11. Huppert H. E., Manins P. C. Limiting conditions for salt-fingering at an interface // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1973. Vol. 20. N. 4. P. 315–323. DOI: 10.1016/0011-7471(73)90056-9

References

1. Stern M. E. The «salt-fountain» and thermohaline convection. *Tellus*, 1960, vol. 12, no. 2, pp. 172–175. DOI: 10.3402/tellusa.v12i2.9378
2. Turner J. S. *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge, UK: Cambridge university press, 1979, 412 p.
3. Schmitt R. W. Observational and laboratory insights into salt finger convection. *Progress in oceanography*, 2003, vol. 56, no. 3–4, pp. 419–433. DOI: 10.1016/S0079-6611(03)00033-8
4. 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
5. Ingel L. Kh., Kalashnik M. V. Nontrivial features in the hydrodynamics of seawater and other stratified solutions. *Physics. Uspekhi*, 2012, vol. 55, pp. 356–381. DOI: 10.3367/UFNe.0182.201204b.0379
6. Stern M. E., Turner J. S. Salt fingers and convecting layers. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1969, vol. 16, no. 5, pp. 497–511. DOI: 10.1016/0011-7471(69)90038-2
7. Taylor J. R., Veronis G. Experiments on double-diffusive sugar-salt fingers at high stability ratio. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, vol. 321, pp. 315–333. DOI: 10.1017/S0022112096007744
8. Sorkin A., Sorkin V., Leizerson I. Salt fingers in double-diffusive systems. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2002, vol. 303, no. 1–2, pp. 13–26. DOI: 10.1016/S0378-4371(01)00396-X
9. Pringle S. E., Glass R. J., Cooper C. A. Double-diffusive finger convection in a Hele-Shaw cell: an experiment exploring the evolution of concentration fields, length scales and mass transfer. *Transport in Porous Media*, 2002, vol. 47, no. 2, pp. 195–214. DOI: 10.1023/A:1015535214283
10. Trevelyan P. M., Almarcha C., De Wit A. Buoyancy-driven instabilities of miscible two-layer stratifications in porous media and Hele-Shaw cells. *Journal of Fluid Mechanics*. 2011, vol 670, pp 38–65. DOI: 10.1017/S0022112010005008
11. Huppert H. E., Manins P. C. Limiting conditions for salt-fingering at an interface. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1973, vol. 20, no. 4, pp. 315–323. DOI: 10.1016/0011-7471(73)90056-9

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ощепков В. О., Мошева Е. А., Мизев А. И.. Неустойчивость двойной диффузии при сонаправленной диффузии растворенных компонент // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2019. № 4. С. 60–65. doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-60-65

Please cite this article in English as:

Oshchepkov V. O., Mosheva E. A., Mizev A. I.. Double diffusive instability during codirectional diffusion of dissolved components. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 4, pp. 60–65. doi: 10.17072/1994-3598-2019-4-60-65