

Труды МАИ. 2023. № 128
Trudy MAI, 2023, no. 128

Научная статья
УДК 533.27, 536.7
DOI: [10.34759/trd-2023-128-09](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-09)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ГАЗОВЫХ СИСТЕМАХ

Игорь Викторович Поярков¹, Лариса Ивановна Липатова²✉

^{1,2}Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, НИУ МГСУ, Москва, Россия

¹p-igor@inbox.ru

²physics.801.lli@mail.ru✉

Аннотация. В статье дается обзор экспериментальных методов регистрации перехода газовой смеси в процессе смешения из режима устойчивой диффузии в состояние диффузионной неустойчивости. Описываются эксперименты по регистрации процесса смешения газовых систем методом тенеграм, который позволяет пронаблюдать динамику процесса смешения, визуально определить границу смены режима во время протекания процесса массопереноса, а также получить качественную информацию о пространственном распределении неоднородностей и характере их поведения на протяжении всего неустойчивого процесса смешения. Катарометрический метод позволяет регистрировать динамику процесса смешения, начиная от нерегулярных колебаний суммарной концентрации и заканчивая установившимся конвективным процессом. Дано описание

количественных методов определения термодинамических параметров системы, при которых возникает диффузионная неустойчивость. Метод определения термодинамических параметров по отношению парциальных потоков компонентов смеси позволяет точно рассчитать границу устойчивой диффузии, а метод использования критериальных чисел дает возможность получить значение критического числа конвективной устойчивости для многокомпонентной газовой смеси в изотермических условиях в поле силы тяжести. Проанализированы преимущества и недостатки использования описанных в работе методов при определении параметров системы, при которых происходит переход из диффузионной области в область неустойчивой диффузии.

Рассмотренные в статье способы регистрации различных типов массопереноса в газовых многокомпонентных системах позволяют проследить процесс изменения режима смешивания газов, определить термодинамические параметры, при которых он возможен, и учитывать его при использовании газов и газовых смесей в технологических процессах в строительстве и при эксплуатации конструкций, при проведении технической экспертизы строительных объектов; при разработке ракетной и аэрокосмической техники; при создании аппаратов химической и нефтехимической промышленности.

Ключевые слова: массообмен, режим смешения, диффузионная неустойчивость, конвекция, метод тенеграмм, катарометрический метод

Для цитирования: Поярков И.В., Липатова Л.И. Экспериментальные методы регистрации процесса диффузионной неустойчивости в газовых системах // Труды МАИ. 2023. № 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-09](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-09)

Original article

EXPERIMENTAL METHODS FOR RECORDING THE PROCESS OF DIFFUSION INSTABILITY IN GAS SYSTEMS

Igor V. Poyarkov¹, Larisa I. Lipatova²✉

National Research Moscow State University of Civil Engineering, NRU MGSU,
Moscow, Russia

¹p-igor@inbox.ru

²physics.801.lli@mail.ru✉

Abstract. The article provides an overview of experimental methods for gas mixture registering the transition from a stable diffusion mode to a state of diffusion instability while mixing process.

Experiments on mixing process registration of gas systems by the shadowgrams method are described. This method allows observing the mixing process dynamics, determining visually the boundary of the mode change during the mass transfer process, as well as obtaining qualitative information on the spatial non-uniformities distribution and the nature of their behavior throughout the unstable mixing process. The catarometric method allows recording the mixing process dynamics, starting from the irregular fluctuations in the total concentration and ending with a steady convective process. The article provides the description of quantitative methods for determining the system thermodynamic parameters, at which diffusion instability occurs. The method for thermodynamic parameters determining with respect to the partial flows of the mixture components allows accurate computing of the stable diffusion boundary, and the method

of criteria numbers application allows obtaining the value of the critical number of convective stability for a multicomponent gas mixture under isothermal conditions in the gravity field. The pros and contras of employing the methods in the article while the system parameters determining, at which transition from the diffusion region to the region of unstable diffusion occurs, are analyzed.

It is noted that experimental methods – the tenegram method and the catarometric method – allow us to observe the nature of the mixing process, while quantitative methods – the method of determining thermodynamic parameters with respect to the partial flows of the mixture components and the method of using criterion numbers – allow us to find the conditions under which it changes.

Keywords: mass transfer; mixing mode; diffusion instability; convection; shadowgram method, catarometric method

For citation: Poyarkov I.V., Lipatova L.I. Experimental methods for recording the process of diffusion instability in gas systems. *TrudyMAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-09](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-09)

Введение

Газы и газовые смеси широко востребованы во многих технологических процессах в промышленности, быту и строительстве. Технические газы в баллонах, а также сжиженные газы незаменимы для усиления бетонных сооружений, используются при работе с металлоконструкциями, в котлованах, шахтах и на строительных площадках для закрепления грунта. Для любой операции сварки и резки металлоконструкций применяются специальные сварочные смеси, состоящие

из инертных газов. А процессы газообмена необходимо рассчитывать при проектировании специальных помещений и конструкций, аппаратов аэрокосмической техники и технологий, для расчета систем вентиляции в химической промышленности и строительстве, при проведении технической и в некоторых случаях судебно-технической экспертизы как эксплуатируемых объектов и устройств, так и находящихся в стадии проектирования или строительства.

Все это приводит к необходимости знания физики массообмена в газах, а также возможности расчета коэффициентов переноса, характерных для стационарных процессов, то есть диффузии [1]. Но в некоторых установках может реализоваться и более интенсивный массообменный процесс, то есть конвективный [2]. Поэтому встает вопрос о регистрации момента смены режима и определении термодинамических параметров системы, при которых он возможен [3].

В данной работе представлен обзор наиболее известных методов прогноза и регистрации момента смены режима массопереноса в газах, а также оценки и расчета термодинамических параметров этого процесса, которые используются в различных областях науки и техники, имеющих отношение к применению газов и газовых смесей.

Существуют различные способы получения количественной и качественной оценки типов массопереноса в газовых многокомпонентных системах. Так эксперименты по исследованию процессов массопереноса теневым [4] и катарометрическим [5] методами позволили получить информацию о типе процесса смешения, а теоретические методы – метод критериальных чисел [6] и метод определения термодинамических параметров по соотношению парциальных

потоков компонентов смеси [7] – дали возможность определить термодинамические параметры, при которых происходит смена режима массопереноса.

Представленные в данной статье исследования носят фундаментальный характер и имеют практическую ценность для правильного выбора используемого метода оценки режима смешения газовых смесей.

Рассмотрим подробнее преимущества и недостатки перечисленных выше методов.

Метод тенеграмм

Проявление неустойчивости в диффузионном процессе впервые было обнаружено при океанографических исследованиях так называемых "солевых фонтанов" в середине 50-х годов [8]. Возникновение аномальной конвекции при экспериментальном исследовании термоэффекта в тройных газовых смесях было открыто Миллером и Мейсоном в 1966 году в трубке Лешмида [9]. Такое поведение газовых смесей при диффузионном смешении они интерпретировали осцилляцией плотности смеси, вызванной концентрационной неустойчивостью системы. Под руководством профессора Жаврина Ю.И. были проведены экспериментальные исследования с водными растворами соли и сахара. В прозрачную плоскую кювету, размещенную в рабочем пространстве теневого прибора, который специально подготовлен к измерениям и проведению фотосъемки, содержащую водный раствор поваренной соли, сверху подают водный раствор трех частей соли и одной части сахара (плотность соли $\rho = 1,125 \frac{г}{см^3}$ и сахара $\rho = 1,057$

$\frac{2}{\text{см}^3}$, соответственно). Бинарная смесь соль-сахар по плотности меньше раствора соли и находится выше него, следовательно, в ячейке процесс смешения подчиняется законам молекулярной диффузии, но это далеко не так. Динамика наблюдаемого процесса представлена на рисунке 1.

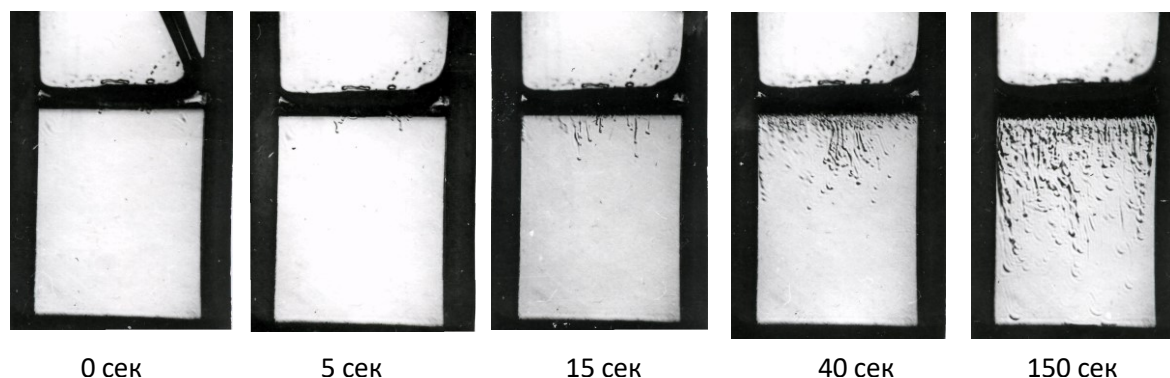


Рисунок 1. Динамика неустойчивого диффузионного смешения в жидкостях

Как видно из рисунка 1, при заполнении ячейки исходными смесями видна четкая граница раздела жидкостей. Эта операция принимается за начало отсчета времени опыта. Через 5 секунд после начала процесса смешения наблюдаются тонкие нитевидные структуры, опускающиеся ко дну кюветы, которые образовались не у стенки сосуда, а на границе раздела жидкостей, их можно интерпретировать как слабое конвективное течение. С увеличением продолжительности эксперимента происходит увеличение числа нитевидных структур, их взаимодействие и независимое перемещение, то есть происходит развитие конвективного массопереноса. На фотографиях, сделанных после 40 секунд процесса, можно наблюдать появление второй границы, в пределах которой наблюдаются равномерное струйное течение. Размер этой области незначительно увеличился с

увеличением времени, что видно на фотографии, сделанной после 150 секунд процесса. В то же самое время можно наблюдать более интенсивное взаимодействие отдельных структур, размеры темных пятен становятся больше, и их перемещение по пространству кюветы напоминает движение перышка в воздухе.

На рисунке 2 и 3 представлены теневые фотографии типичных результатов процесса смешения, экспериментально исследованных квазистационарным двухколбовым методом [4] для цилиндрического и плоского каналов соответственно.



а) устойчивая диффузия

б) конвективное смешение

$p = 0.34$ МПа

$p = 3.0$ МПа

Рисунок 2. Теневые снимки процесса смешения в системе $0.5 \text{ He} + 0.5 \text{ Ar} - \text{N}_2$.

В соответствии с фотографией, рис. 2.а, при давлении $p = 0,34$ МПа в тройной системе никаких аномалий не наблюдалось. Четко видны области, заполненные чистым газом и исходной смесью, и область, где происходит диффузия. На рисунке 2.б проникновение газов друг в друга в начальной стадии носит сложный характер, напоминающий веретенообразную структуру, которая разрушается с течением времени. Область диффузии выделить невозможно, но зато отчетливо

просматриваются структуры с другой плотностью. Со временем они перемещаются и исчезают.

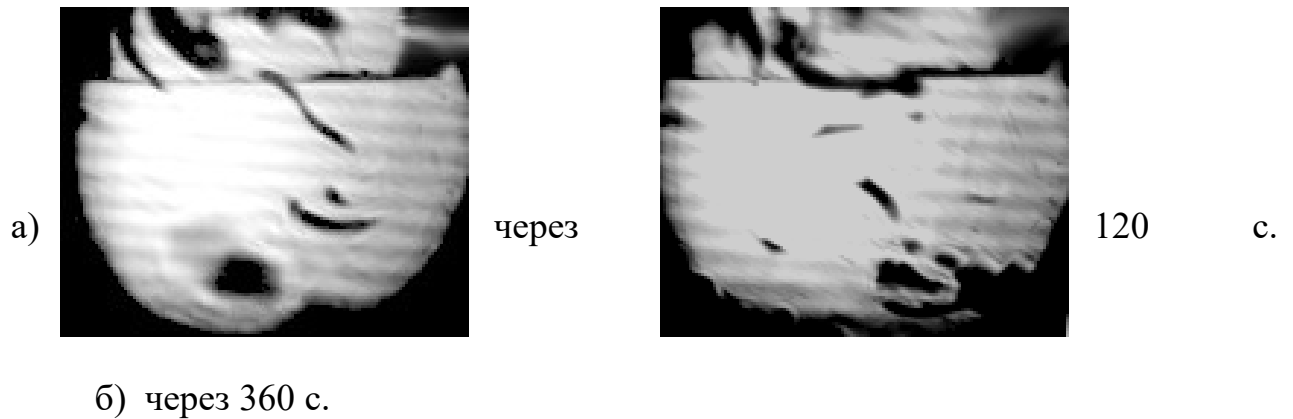


Рисунок 3. Теневые снимки массопереноса в плоском диффузионном канале

В случае плоского диффузионного канала с геометрическими размерами $17 \times 5 \times 0,6$ см [10] на рис. 3 представлена тенеграмма процесса в трехкомпонентной газовой системе $0.76\text{C}_3\text{H}_8 + 0.24\text{CO}_2 - \text{N}_2\text{O}$ при $P_{\text{изб}} = 5 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$. Видны структурные образования, которые перемещаются как внутри диффузионного канала, так и в нижней колбе диффузионного аппарата. Причем интенсивность конвекции остается практически постоянной на значительном промежутке времени процесса смешения.

Катарометрический метод

Еще одним методом регистрации различных типов смешения является катарометрический [11]. В частности, этот метод позволил регистрировать в динамике весь неустойчивый процесс смешения от нерегулярных колебаний суммарной концентрации к упорядоченному режиму и на завершающей стадии к молекулярному переносу, рис. 4.

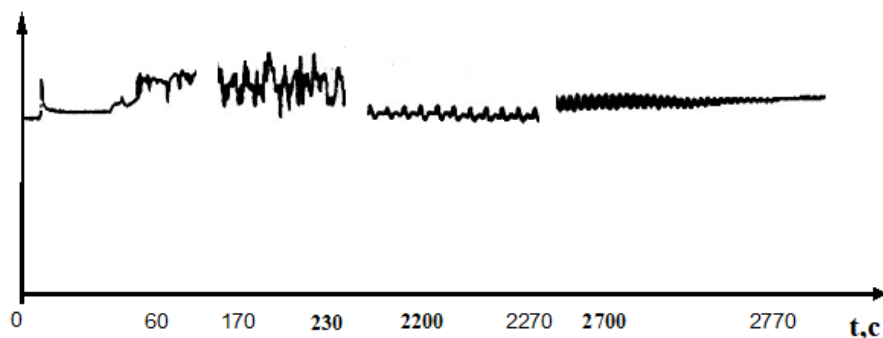


Рисунок 4. Колебательные режимы для системы $0.51 \text{ He} + 0.49 \text{ N}_2 - \text{CH}_4$ при $T = 298.0 \text{ K}$ и $P = 3.5 \text{ МПа}$

После открытия перекрывающего устройства в течение некоторого времени колебания отсутствуют. Это свидетельствует о том, что образовавшиеся структуры еще не достигли нити катарометра, или происходит диффузионный процесс. Затем наступают нерегулярные колебания, которые со временем переходят в затухающие периодические. На представленной диаграмме четко прослеживаются смены режимов колебаний, причем в некоторых ситуациях колебательный характер изменения концентраций компонентов затухает и затем появляется вновь. После хаотичного режима существования структурированных течений можно выявить основные частоты осциллирования $\sim 2,0$ и $1,0$ Гц.

Метод определения термодинамических параметров по отношению парциальных потоков компонентов смеси

Строгое определение границы устойчивой диффузии удастся получить, если проследить за отношением парциальных потоков компонентов $\alpha_i = Q_{\text{эксн } i} / Q_{\text{теор } i}$. В замкнутой системе колб $\alpha_i = Q_{\text{эксн } i} / Q_{\text{теор } i} = c_{\text{эксн } i} / c_{\text{теор } i}$, где c_i – концентрации продиффундировавших компонентов. На рис.5 изображена функциональная

зависимость коэффициента α от давления для смеси $0,7796 \text{ He} + 0,2204 \text{ R}_{12} - \text{Ar}$, при $T=298,0 \text{ K}$ [7]. Точки – экспериментальные данные. Сплошная линия – расчет в предположении устойчивой диффузии. Пунктирная линия – аппроксимация экспериментальных данных.

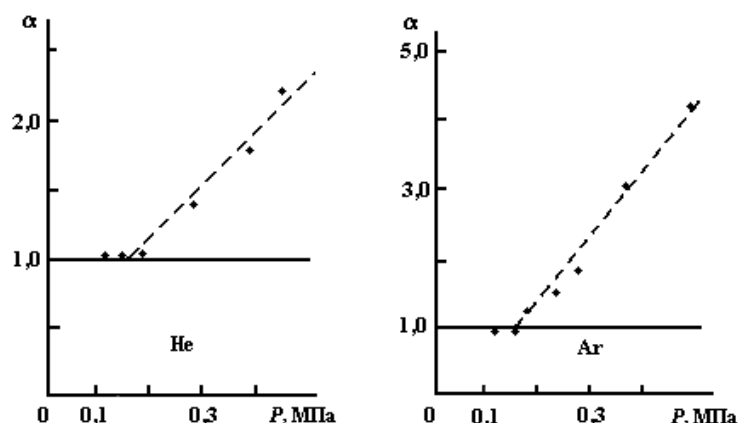


Рисунок 5. Зависимость параметра α от давления

Нетрудно заметить, что при определенном давлении, называемом критическим, отношение концентраций начинает резко возрастать, что свидетельствует об изменении массопереноса и возникновении конвекции.

Особенности регистрации процесса диффузии в газах с помощью различных методов

Перед началом обсуждения результатов, представленных выше, следует отметить, что массоперенос осуществляется в гравитационно устойчивых системах. Более плотный смешивающийся компонент, или смесь, находится над менее плотным. Компоненты системы химически не взаимодействуют. То есть в исследуемых системах должен осуществляться только массоперенос за счет теплового движения компонентов системы.

Как показал эксперимент, представленный на рисунке 1, процесс смешения носит достаточно сложный характер. На тенеграмме, полученной с помощью метода Теплера, можно видеть, что до 5 сек. массоперенос подчиняется законам молекулярной диффузии. Область смешения имеет более темный равномерный окрас с четкой границей раздела. На тенеграммах с 15 сек. и далее видны нитевидные области разного размера и формы, причем с увеличением продолжительности эксперимента их количество и форма существенно изменяется. Такое возможно, если процесс смешения становится конвективным. Если внимательно рассмотреть тенеграммы на 40 сек. и 150 сек, можно увидеть, что в смещивающейся системе наблюдается новая граница раздела. Появилась область, в которой нитевидные структуры имеют упорядоченное строение, что характерно для ламинарного течения. А также можно наблюдать и хаотическое (турбулентное) движение смеси.

Аналогичное поведение темных областей можно наблюдать при массопереносе в газах. Представленные на этих тенеграммах (рисунки 2 и 3) результаты были получены разными методами. Рисунок 2 методом Лошмидта в области массопереноса. Рисунок 3 – двухколбовым методом в различных частях установки (диффузионном канале и нижней колбе), которые имеют существенно разные геометрические параметры.

Другой метод, рассмотренный нами, – катарометрический – позволяет более точно определить границы смены режима массопереноса и выделить характерные этапы развития процесса смешения. Как показано выше, в ходе экспериментального

исследования удалось выделить две характерные частоты осциллирования установившегося конвективного процесса.

В статье рассмотрен метод по определению границы характера массопереноса, основанный на сравнении основных характеристик массообмена (концентрации или парциальных потоков смешивающихся компонентов), рис 5. Данным методом можно в пределах экспериментальной погрешности определить термодинамические параметры, например, давление, при которых происходит смена молекулярного массопереноса на конвективное смешение.

Еще один из методов, упоминаемый в статье, позволяющий определить границы смены режимов массопереноса, – это использование критериальных чисел. В критериальных числах уже заложено соотношение различных параметров. Например, число Рэлея используют для характеристики движения среды как целого.

Недостатки и преимущества различных экспериментальных методов регистрации процесса диффузии в газах

Одним из основных достоинств метода тенеграмм можно отметить возможность исследовать массоперенос в различных агрегатных состояниях. Главное, чтобы в этих системах можно было реализовать существенное отличие оптических характеристик компонентов. Например, в жидкости или газе такой характеристикой служит показатель преломления. Также можно отметить возможность «визуализации» процесса, что позволяет качественно оценить время смены одного режима смешения другим [4], даже на существенно различных установках. Однако количественная оценка полученных результатов достаточно

сложна. В основном это связано со сложностью цифровой обработки информации. В настоящее время такая обработка успешно применяется в основном для изучения характеристик газового потока [14]. В большинстве случаев качественной характеристики бывает достаточно, чтобы судить о темпе процесса массопереноса.

Относительно катарометрического метода регистрации процесса смешения газовых систем можно заметить, что данный метод не позволяет количественно определить параметры системы, при которых происходит смена режима смешения. Это происходит потому, что на показания катарометрического датчика влияет не только состав газовой смеси, находящейся в области датчика, но и ее скорость движения [6]. Особенно это трудно сделать в многокомпонентных газовых системах и практически невозможно сделать в жидкостях.

Метод определения термодинамических параметров по отношению парциальных потоков компонентов смеси позволяет количественно получить характеристики массопереноса каждого компонента, что позволяет сделать вывод о вкладе отдельного компонента системы в массообменный процесс. У метода сравнения отношения отдельных характеристик компонентов есть недостаток – нет возможности проследить динамику развития процесса смешения. Также сложно сделать общий анализ влияния многих факторов на характер течения массопереноса.

В настоящее время часто применяются модельные методы по определению термодинамических параметров смены режима массопереноса, основанные на решении системы уравнений Навье-Стокса и теории возмущений [9, 13]. Метод критерияльных чисел Рэлея позволяет более полно определить параметры системы, при которых происходит смена режимов смешения, проследить динамику развития

процесса массопереноса. Такими параметрами или характеристиками могут быть как термодинамические параметры системы (давление, температура и т. п.), так и геометрические характеристики установки, в которой реализуется массообменный процесс (длина, радиус, объем и т.п.) [7]. К недостаткам данного метода можно отнести его «модельность», основанная на решении различными методами основных уравнений гидродинамики и массопереноса. Также данный метод требует верификации с помощью хорошо изученных экспериментальных методов.

Заключение

Использование не одного, а нескольких методов позволяет точно определить тип массопереноса, который реализуется или будет реализован в установке как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации. Особенно при учете того, что при эксплуатации промышленных зданий в них устанавливается различное оборудование, которое может создавать вибрацию, например, двигатели. Если в этом же здании находится установка, в которой происходит сложный массообменный процесс, то необходимо учитывать возможность возникновения резонансных явлений, что может привести к негативным эксплуатационным последствиям. Такая ситуация заставляет более точно оценить параметры смешения газовых компонентов смесей при эксплуатации установки.

Экспериментальные и теоретические методы дают возможность определять области диффузионного и конвективного смешения в многокомпонентных газовых системах. Одни методы позволяют наблюдать за характером процесса смешения, другие позволяют найти условия, при которых он изменяется.

Использование теневого или катарометрического методов при регистрации процесса смешения в газовых смесях позволяет определить термодинамические параметры системы, при которых происходит режим смешения. Это можно сделать, например, путем сравнения экспериментальных данных (концентрации продиффундировавших компонентов, парциальных потоков и т.п.) с вычисленными в предположении устойчивого диффузионного переноса.

В то же время рассмотренные теоретические методы показали, что переход из диффузионной области в область неустойчивой диффузии происходит при определенных параметрах системы, и позволили определить эти параметры. Если говорить о термодинамическом параметре, то это может быть давление, связанное с концентрацией смешиваемых компонентов. При давлении меньше критического в системе происходит диффузия. Выше него наблюдаются конвективный массоперенос.

Применение разных методов совместно позволит более точно сказать, какой массоперенос может быть реализован в проектируемом аппарате или устройстве, что, несомненно, будет способствовать более объективному рассмотрению вопросов, возникающих при проведении технических экспертиз эксплуатируемых и строящихся зданий и сооружений.

Описанные методы призваны решить одну из фундаментальных научных задач термодинамики, имеющих широкое практическое применение во всех отраслях промышленности, техники, строительства, которые сталкиваются с использованием в своих производственных процессах газов и газовых смесей.

Важно понимание их возможностей и особенностей использования в тех или иных условиях и правильного выбора для решения конкретных практических задач.

Список источников

1. Marrero T.R., Mason E.A. Gaseous Diffusion Coefficients// Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1972, no. 1, pp. 117. DOI: 10.1063/1.3253094
2. Miller L., Mason E.A. Oscillating instabilities in multicomponent diffusion // The Physics of Fluids, 1966, no.9, pp. 711-721. DOI: 10.1063/1.1761737.
3. Мухамбетова А., Косов В.Н. Особенности многокомпонентного изотермического смешения газовых смесей на границе "диффузия - конвекция"// Universum: технические науки. 2022. № 5 (98). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13737>. DOI:10.32743/UniTech.2022.98.5.13737
4. Косов В.Н., Бычков А.Г., Жаврин Ю.И. Применение теневого метода для визуализации конвективных потоков, образующихся при диффузии в многокомпонентных газовых смесях // Теплофизика и аэромеханика. 1994. № 1. С. 87-90.
5. Косов В.Н., Федоренко О.В. Конвективные режимы при диффузии в трехкомпонентных газовых системах при различном содержании самого тяжелого по плотности компонента в смеси // Вестник Московского государственного областного педагогического университета. 2018. № 1. С. 119-127.

6. Косов В.Н., Жаврин Ю.И., Мукамеденкызы В., Федоренко О.В., Молдабекова М.С. Неустойчивость механического равновесия в трехкомпонентных газовых системах с близкими массами молекул у диффундирующих компонентов // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2012. № 2 (10). С. 155-158.
7. Косов В.Н., Федоренко О.В., Жаврин Ю.И., Мукамеденкызы В. Неустойчивость механического равновесия при диффузии в трехкомпонентной газовой смеси // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 4. С. 15-18.
8. Stommel H., Arons A., Blanchard D. An oceanographical curiosity: the perpetual salt fountain // Environmental Science, 1955, no. 3, pp. 152-153. DOI:10.1016/0146-6313(56)90095-8.
9. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная неустойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. - 392 с.
10. Александров О.Е., Селезнев В.Д. Зависимость скорости смешения от давления при свободной конвекции бинарной смеси газов в двухколбовом аппарате // Журнал технической физики. 2017. Т. 90. № 3. С. 550-556.
11. Жаврин Ю.И., Мукамеденкызы В., Поярков И.В. Диффузионно-конвективное смешивание бинарной смеси пропана и диоксида углерода с чистой закисью азота // Журнал технической физики. 2007. Т. 52. № 7. С. 947-949.
12. Комаров В.В., Пономарев А.А., Пономарев Н.Б. Экспериментальные исследования нетипичного отрыва потока газа в сопле с коническим насадком // Труды МАИ. 2010. № 40. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=22868>

13. Быков Л.В., Никитин П.В., Пашков О.А. Математическое моделирование процессов обтекания затупленного тела высокоскоростным потоком // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=53445>
14. Бодрышев В.В., Абашев В.М., Тарасенко О.С., Миролюбова Т.И. Интенсивность изображения, как количественная характеристика параметров газового потока // Труды МАИ. 2016. № 88. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=70428>
15. Молдабекова М.С., Асембаева М.К., Федоренко О.В. Экспериментальное исследование влияния давления на разделение газовой смеси с двуокисью углерода // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 4. С. 901-905.
16. Trengove R.D., Robjohnsand H.L., Dunlop P.J. Diffusion coefficients and thermal diffusion factors for H₂—N₂, D₂—N₂ and H₂—O₂, D₂—O₂ systems // Physical Chemistry, 1983, no. 87, pp. 1187-1190.
17. Косов В.Н., Красиков С.А., Федоренко О.В. Диффузионная и конвективная неустойчивость в многокомпонентных газовых смесях при различных давлениях // Европейский физический журнал. Специальные темы. 2017. № 226. С. 1177-1187. DOI:10.1140/epjst/e2016-60201-1
18. Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Жаврин Ю.И. Влияние концентрации компонентов смеси на возникновение конвективных режимов смешения при диффузии в тройных газовых системах // Журнал физической химии. 2017. Т. 91. № 6. С. 984-989. DOI:10.7868/S0044453717060152

19. Федюшкин А.И., Пунтус А.А. Нелинейные особенности ламинарных течений жидкости на земле и в невесомости // Труды МАИ. 2017. № 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98829>
20. Kossov V., Asembaeva M., Mukamedenkyzy V. et al. Intensification of the Separation of Isothermal Ternary Gas Mixtures Containing Carbon Dioxide // *Chemical Engineering & Technology*, 2021, vol. 44 (11). DOI:[10.1002/ceat.202100241](https://doi.org/10.1002/ceat.202100241)
21. Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Федоренко О.В. Экспериментальные методы исследования диффузии и концентрационной гравитационной конвекции, вызванной неустойчивостью механического равновесия в многокомпонентных газовых смесях. - Алматы: Қазақ университеті, 2015. - 172 с.

References

1. Marrero T.R., Mason E.A. Gaseous Diffusion Coefficients, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1972, no. 1, pp. 117. DOI: 10.1063/1.3253094
2. Miller L., Mason E.A. Oscillating instabilities in multicomponent diffusion, *The Physics of Fluids*, 1966, no. 9, pp. 711-721. DOI: 10.1063/1.1761737.
3. Mukhambetova A., Kosov V.N. *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2022, no. 5. (98), URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13737>. DOI:10.32743/UniTech.2022.98.5.13737
4. Kosov V.N., Bychkov A.G., Zhavrin Yu.I. *Teplofizika i aeromekhanika*, 1994, no. 1, pp. 87-90.

5. Kosov V.N., Fedorenko O.V. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo pedagogicheskogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 119-127.

6. Kosov V.N., Zhavrin Yu.I., Mukamedenkyzy V., Fedorenko O.V., Moldabekova M.S. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii*, 2012, no. 2 (10), pp. 155-158.

7. Kosov V.N., Seleznev V.D., Zhavrin Yu.I. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2000, vol. 73, no. 2, pp. 313-320.

8. Stommel H., Arons A., Blanchard D. An oceanographical curiosity: the perpetual salt fountain, *Environmental Science*, 1955, no. 3, pp. 152-153. DOI:10.1016/0146-6313(56)90095-8.

9. Gershuni G.Z., Zhukhovitskii E.M. *Konvektivnaya neustoichivost' neszimaemoi zhidkosti* (Convective Stability of Incompressible Fluid), Moscow, Nauka, 1972, 392 p.

10. Aleksandrov O.E., Seleznev V.D. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2017, vol. 90, no. 3, pp. 550-556.

11. Zhavrin Yu.I., Mukamedenkyzy V., Poyarkov I.V. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2007, vol. 52, no. 7, pp. 947-949.

12. Komarov V.V., Ponomarev A.A., Ponomarev N.B. *Trudy MAI*, 2010, no. 40. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=22868>

13. Bykov L.V., Nikitin P.V., Pashkov O.A. *Trudy MAI*, 2014, no. 78. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53445>

14. Bodryshev V.V., Abashev V.M., Tarasenko O.S., Miroljubova T.I. *Trudy MAI*, 2016, no. 88. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=70428>

15. Moldabekova M.S., Asembaeva M.K., Fedorenko O.V. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2019, vol. 92, no. 4, pp. 901-905.
16. Trengove R.D., Robjohnsand H.L., Dunlop P.J. Diffusion coefficients and thermal diffusion factors for H₂—N₂, D₂—N₂ and H₂—O₂, D₂—O₂ systems, *Physical Chemistry*, 1983, no. 87, pp. 1187-1190.
17. Kosov V.N., Krasikov S.A., Fedorenko O.V. *Evropeiskii fizicheskii zhurnal. Spetsial'nye temy*, 2017, no. 226, pp. 1177-1187. DOI:10.1140/epjst/e2016-60201-1
18. Kosov V.N., Kul'zhanov D.U., Zhavrin Yu.I. *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 2017, vol. 91, no. 6, pp. 984-989. DOI:10.7868/S0044453717060152
19. Fedyushkin A.I., Puntus A.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 102. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98829>
20. Kossov V., Asembaeva M., Mukamedenkyzy V. et al. Intensification of the Separation of Isothermal Ternary Gas Mixtures Containing Carbon Dioxide, *Chemical Engineering & Technology*, 2021, vol. 44 (11). DOI:10.1002/ceat.202100241
21. Zhavrin Yu.I., Kosov V.N., Kul'zhanov D.U., Fedorenko O.V. *Eksperimental'nye metody issledovaniya diffuzii i kontsentratsionnoi gravitatsionnoi konveksii, vyzvannoi neustoichivost'yu mekhanicheskogo ravnovesiya v mnogokomponentnykh gazovykh smesyakh* (Experimental methods for studying diffusion and concentration gravitational convection caused by instability of mechanical equilibrium in multicomponent gas mixtures), Almaty, Kazak universiteti, 2015, 172 p.

Статья поступила в редакцию 27.12.2022

Одобрена после рецензирования 12.01.2023

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 27.12.2022; approved after reviewing on 12.01.2023;
accepted for publication on 27.02.2023