

УДК 544.034

Анализ экспериментальных значений коэффициентов молекулярной диффузии чистых газов в воде

Д-р техн. наук А. Г. НОВОСЕЛОВ¹, С. А. СОРОКИН¹,
 д-р техн. наук И. В. БАРАНОВ¹, канд. техн. наук А. Б. ДУЖИЙ²

¹Университет ИТМО

²ВНИИ Галургии

E-mail: sorokinsa@itmo.ru

Исследование посвящено изучению вопросов молекулярного массопереноса в системах газ-вода с целью получения математических зависимостей для вычисления численных значений коэффициентов молекулярной диффузии. Это позволит специалистам различных областей, связанных с массообменными процессами, применить научно-обоснованный подход при проектировании современных конструкций массообменных аппаратов. В данной работе использован аналитический метод исследования, позволивший на основе имеющихся в научно-технической литературе данных по коэффициентам молекулярной диффузии, полученных экспериментальным путем при различных температурах и атмосферном давлении, составить эмпирические соотношения для вычисления таких коэффициентов в широком интервале температур. Дано обоснование в пользу его применения. В результате исследования была предложена математическая зависимость вида $D_{AB}=K \cdot \exp^{bt}$, которая хорошо согласуется с кинетической теорией процесса диффузии. Определены численные значения коэффициентов K и b для семи систем газ-вода. Выдвинуто мнение о зависимости коэффициента пропорциональности K от величины мольного объема диффундирующего газа. Полученные результаты позволят в дальнейшем прогнозировать возможный вид кривой зависимости коэффициентов молекулярной диффузии от температуры при изучении других газожидкостных систем, а также на их основе возможна апробация новых методов исследования молекулярного переноса массы.

Ключевые слова: молекулярная диффузия; вода; массоперенос; температурная зависимость.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 24.01.2022, принята к печати 25.02.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-98-104

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Новоселов А. Г., Сорокин С. А., Баранов И. В., Дужий А. Б. Анализ экспериментальных значений коэффициентов молекулярной диффузии чистых газов в воде // Вестник Международной академии холода. 2022. № 1. С. 98–104. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-98-104

Analysis of experimental values of molecular diffusion coefficients for pure gases in water

D. Sc. A. G. NOVOSELOV¹, S. A. SOROKIN¹, D. Sc. I. V. BARANOV¹, Ph. D. A. B. DUZHIIJ²

¹ITMO University

²All-Russian Research Institute of Halurgy

E-mail: sorokinsa@itmo.ru

The research is devoted to the study of molecular mass transfer in gas-water systems in order to obtain mathematical dependencies for calculating numerical values of molecular diffusion coefficients. These values will allow specialists in various fields related to mass transfer processes to apply a scientifically based approach to the design of modern designs of mass transfer devices. In this work, an analytical research method was used, which made it possible, based on the data available in the scientific and technical literature on molecular diffusion coefficients obtained experimentally at various temperatures and atmospheric pressure, to obtain empirical relations for calculating such coefficients in a wide temperature range. Application of the method is justified. As a result of the study, a mathematical dependence of the type $D_{AB}=K \cdot \exp^{bt}$ was proposed, which is in good agreement with the kinetic theory of the diffusion process. Numerical values of coefficients K and b for seven gas-water systems are determined. The opinion about the dependence of the proportionality coefficient K on the molar volume of the diffusing gas is put forward. The obtained results will make it possible to further predict the possible form of the curve of the dependence of the molecular diffusion coefficients on temperature when studying other gas-liquid systems, and also on their basis it is possible to test new methods for studying molecular mass transfer.

Keywords: molecular diffusion; water; mass transfer; temperature dependence.

Article info:

Received 24/01/2022, accepted 25/02/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-98-104

Article in Russian

For citation:Novoselov A. G., Sorokin S. A., Baranov I. V., Duzhij A. B. Analysis of experimental values of molecular diffusion coefficients for pure gases in water. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 1. p. 98–104. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-98-104**Введение**

В современной химической промышленности перерабатывается сырье различных видов и производится огромное количество конечных целевых продуктов. Технология добычи и переработки исходного сырья — нефти и природного газа, требует использования целого ряда процессов: гидродинамических, тепловых, массообменных и других, определенных конкретной технологией. Определяющее значение в получении конечного целевого продукта имеют массообменные и химические процессы, протекающие между твердой, жидкой и газовой фазами, и происходящие в широком диапазоне давлений и температур. Реализация этих процессов проводится с помощью соответствующего технологического оборудования [1].

Разработка оптимальных технологических процессов переработки сырья в конечный целевой продукт невозможна без наличия достоверной информации по теплофизическим свойствам химических соединений и их смесей [2]. Как правило, именно физические и теплофизические свойства составляют от 50 до 90% исходных данных при проектировании технологической аппаратуры.

При непосредственном контактировании газа с жидкостью неизбежно происходит их взаимодействие на молекулярном уровне, которое сопровождается переносом массы вещества из обеих фаз или диффузией [3]. Как явление — это взаимодействие наблюдается независимо от того находятся ли эти фазы в движении или в абсолютном покое.

При температуре выше абсолютного нуля молекулы перемещаются вследствие их теплового движения. При отсутствии перемешивания или конвекции этот процесс называется молекулярной диффузией. Для однокомпонентных систем в случае равенства химических потенциалов такое движение молекул называется самодиффузией [4]. По причине прекращения воздействия градиента концентраций перемещение молекул носит хаотичный характер, что приводит к отсутствию направленного диффузионного потока. Следовательно, при нахождении скорости массообменных процессов влияние коэффициента самодиффузии не имеет определяющего значения для понимания механизма массопереноса, однако играет важную роль в представлении протекания процесса молекулярной диффузии бинарных или многокомпонентных материальных систем.

Перемещение молекул одного вещества в другое через граничную поверхность, разделяющую контактирующие фазы, происходит из-за наличия движущей силы. Стремясь к термодинамическому равновесию, материальная система приближается к выравниванию локальных разностей химических потенциалов, что приводит

к направленному движению молекул диффундирующего вещества. В случае, когда внутренняя энергия диффузионной системы изменяется незначительно, под движущей силой процесса рассматривают разность концентраций диффундирующего вещества. Возникновение диффузионного потока в процессе массопереноса может происходить при воздействии других параметров, основными из которых являются давление и температура. Диффузия, возникающая под действием наличия градиента температуры, называется термодиффузией [5], а под действием градиента давления — бародиффузией [6].

Целью данной работы является получение уравнений для оценки коэффициентов молекулярного переноса массы различных газов в воде. Такие коэффициенты составляют основу универсального уравнения, учитывающего влияние концентрации различных растворенных веществ в воде. Для этого был проведен сбор, обобщение и анализ известных значений коэффициентов молекулярной диффузии (КМД) при различных температурах, взятых из научно-технической литературы. В ходе введения литературного обзора выяснилось, что такого обширного анализа по значениям КМД различных газов в воде не выполнялось. Проведенное исследование послужит основой при разработке авторами нового метода по определению КМД и для калибровки экспериментального стенда по вычислению данного коэффициента для систем газ-жидкость.

Полученные результаты значительно облегчат получение информации о коэффициентах переноса массы исследуемых сред. Совершенствование различных подходов к разработке физической модели процесса молекулярного переноса и его экспериментальная проверка позволит глубже понять механизм переноса и максимально использовать возможности теории для более объективных инженерных решений.

Методы расчетов

Молекулярные теории диффузии основаны на попытках объяснить механизм процессов массопереноса и получить законы, управляющие этими процессами на основе молекулярной структуры данных газовой и жидкостной сред и их свойств. Классическое уравнение переноса массы по стационарному механизму молекулярной диффузии представлено первым законом Фика [7], в котором D_{AB} не зависит от концентрации переносимого вещества A в веществе B

$$M_A = -D_{AB}S \tau \frac{dC_A}{dn}, \quad (1)$$

где M_A — масса вещества A , кг; D_{AB} — коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; S — площадь поверхно-

сти, расположенная перпендикулярно к направлению диффузионного потока, m^2 ; τ — время проведения процесса диффузии, c ; $\frac{dC_A}{dn}$ — градиент концентрации вещества A в веществе B в направлении n , $кг/м^4$.

В случае нестационарного механизма молекулярной диффузии описание процесса осуществляется по второму закону Фика [8], учитывающему влияние концентрации вещества A в веществе B на D_{AB} .

$$\frac{\partial C_A}{\partial \tau} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial n^2}. \quad (2)$$

В данной работе рассматривается стационарный процесс молекулярной диффузии, обусловленный только разностью концентраций растворенного диффундирующего газа A в воде B , т. е. процесс, протекающий в изотермических и изобарических условиях.

В большинстве случаев молекулы газа имеют малые размеры по отношению к молекулам веществ, находящихся в жидком состоянии, в том числе и к молекулам воды и их растворимость достаточно ограничена, что позволяет, в ряде экспериментальных методов, использовать, в качестве расчетного уравнения, первый закон Фика.

Экспериментальным исследованиям молекулярной диффузии различных газов в воде посвящено большое число работ. Наиболее полные сведения о методах экспериментального определения КМД газов в различных жидкостях представлены в работах [9]–[12].

Анализируя представленные в литературе данные можно увидеть, что значения КМД, полученные для любой системы газ-жидкость, при одной и той же температуре, у различных исследователей, отличаются друг от друга [13]. Однако, нельзя приуменьшать практическую значимость собранных данных, поскольку, используя различные экспериментальные установки и, соответственно, отличающиеся методы измерения коэффициента молекулярной диффузии D_{AB} при различных температурах, отрицательные факторы, влияющие на определение истинного значения данного коэффициента, нивелируются. Так как методы определения коэффициента D_{AB} относятся к косвенным методам измерений, то все они имеют определенные преимущества и недостатки, которые зависят от применяемой измерительной аппаратуры для каждого конкретного метода, субъективных ошибок исследователей и/или недостаточного учета влияния условий внешней среды. Также нельзя исключать влияния возникающих погрешностей при измерении физических величин, которые вызваны несовершенством самого измерительного оборудования.

Результаты аналитической работы

Исходя из вышесказанного необходимо отметить, что выбранный авторами подход к оценке истинного значения D_{AB} , опирающийся на экспериментальные данные разных исследователей, является вполне рациональным. Несовершенства одних методов исключены другими, кроме того, системы измерений также отличаются друг от друга. В итоге появляется некое сглаживание отклонений измерений относительно различных мето-

дик, что делает выбор в пользу данного способа расчета коэффициента D_{AB} логичным и обоснованным. Во всяком случае, авторами была предпринята попытка обобщить данные по D_{AB} , ранее проведенных исследований по каждой системе газ — жидкость, и представить результаты этой математической обработки. В данной работе представлены зависимости по расчету КМД для семи систем газ — жидкость. Числовые значения D_{AB} и температур, при которой они были получены, взяты из оригинальных работ и приведены в справочнике [13].

Для системы диоксид углерода (CO_2) — вода, данные по D_{AB} , в зависимости от температуры, обобщились следующей зависимостью

$$D_{AB} = 1,09 \cdot 10^{-9} \cdot \exp^{0,0221t}, \quad (3)$$

получение которой более подробно изложено в одной из предыдущих работ авторов [14].

В работе авторов [15] представлен вывод уравнения для системы кислород (O_2) — вода, имеющий следующий вид

$$D_{AB} = 1,214 \cdot 10^{-9} \cdot \exp^{0,0241t}. \quad (4)$$

Дальнейший анализ позволил получить уравнения расчета значений D_{AB} для перечисленных ниже систем.

Для системы водород (H_2) — вода

$$D_{AB} = 2,54 \cdot 10^{-9} \cdot \exp^{0,0195t}. \quad (5)$$

Графическая зависимость параметров, указанного уравнения (5) представлена на рис. 1, а на рис. 2 представлена графическая интерпретация отклонения значений $D_{\text{расч.}}$ рассчитанных по данному уравнению от экспериментальных значений $D_{\text{эксп.}}$. Максимальное отклонение составило 16%.

Для системы гелий (He) — вода

$$D_{AB} = 4,01 \cdot 10^{-9} \cdot \exp^{0,0202t}. \quad (6)$$

При сравнении видно, что максимальное отклонение значений $D_{\text{расч.}}$ рассчитанных по уравнению (6) от экспериментальных значений $D_{\text{эксп.}}$ составляет 14% (см. рис. 3, 4).

Для системы хлор (Cl_2) — вода

$$D_{AB} = 0,787 \cdot 10^{-9} \cdot \exp^{0,0253t}. \quad (7)$$

Отметим, что максимальное отклонение значений $D_{\text{расч.}}$ рассчитанных по уравнению (7) от экспериментальных значений $D_{\text{эксп.}}$ составляет 15% (см. рис. 5, 6).

Для системы диоксид серы (SO_2) — вода

$$D_{AB} = 0,921 \cdot 10^{-9} \cdot \exp^{0,0251t}. \quad (8)$$

По указанному уравнению (8) максимальное отклонение значений $D_{\text{расч.}}$ от экспериментальных значений $D_{\text{эксп.}}$ составило 10% (см. рис. 7, 8).

Для системы азот (N_2) — вода (см. рис. 9, 10)

$$D_{AB} = 1,096 \cdot 10^{-9} \cdot \exp^{0,0247t}. \quad (9)$$

Математические зависимости, указанные выше, позволяют вычислять D_{AB} в диапазоне изменения температуры от 10 °C до 60 °C с достаточной для инженерных расчетов точностью. Максимальное отклонение экспериментальных значений $D_{\text{эксп.}}$ от расчетных значений D_{AB} для указанных систем составляет не более 16%.

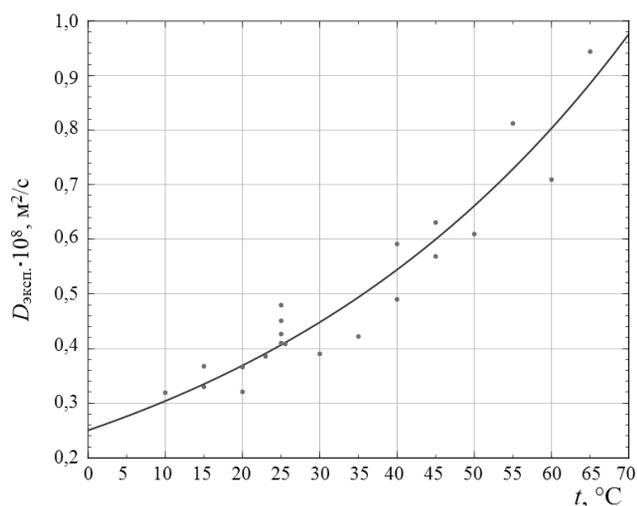


Рис. 1. Зависимость коэффициента молекулярной диффузии от температуры при атмосферном давлении (система $H_2 - H_2O$)

Fig. 1. Dependency of the molecular diffusion coefficient on temperature at atmospheric pressure ($H_2 - H_2O$ system)

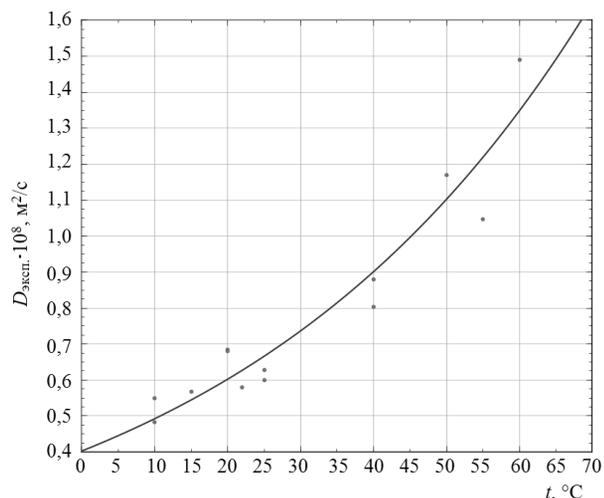


Рис. 3. Зависимость коэффициента молекулярной диффузии от температуры при атмосферном давлении (система $He - H_2O$)

Fig. 3. Dependency of the molecular diffusion coefficient on temperature at atmospheric pressure ($He - H_2O$ system)

Корректность предложенных формул подтверждается, в том числе, сравнением с результатами авторов работы [16], определившими, экспериментально, значение $D_{AB} = 1,98 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ для системы кислород — вода при температуре 20 °С. Расчетное значение D_{AB} для этой системы по уравнению (4), при той же самой температуре, дает значение $D_{AB} = 1,97 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

Проведенный анализ литературных источников с последующей систематизацией найденных данных позволил получить достаточно простые формулы для расчета КМД газов в воде. Рассматривая полученные уравнения, можно заметить, что изменение коэффициента диффузии исследованных газов в воде от температуры подчиняется практически одной зависимости

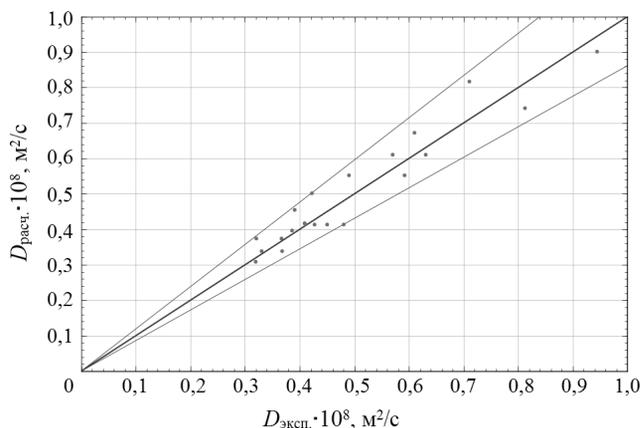


Рис. 2. Сравнение расчетных значений коэффициентов молекулярной диффузии $D_{\text{расч.}}$ с экспериментальными $D_{\text{эксп.}}$ (система $H_2 - H_2O$)

Fig. 2. Comparison of the design values for the coefficient of molecular diffusion $D_{\text{расч.}}$ with the experimental ones $D_{\text{эксп.}}$ ($H_2 - H_2O$ system)

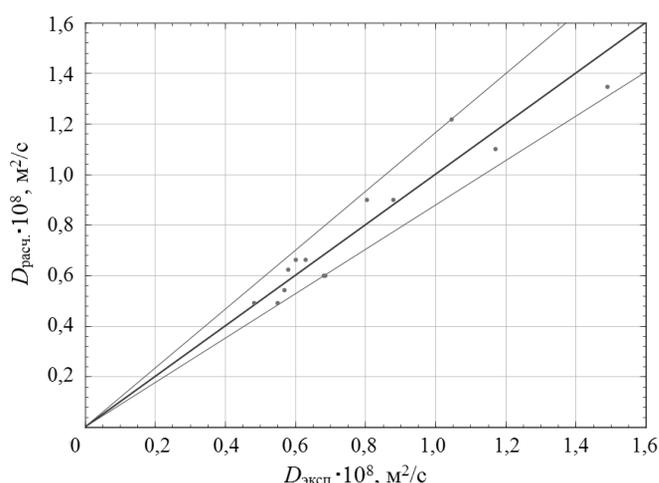


Рис. 4. Сравнение расчетных значений коэффициентов молекулярной диффузии $D_{\text{расч.}}$ с экспериментальными $D_{\text{эксп.}}$ (система $He - H_2O$)

Fig. 4. Comparison of the design values for the coefficient of molecular diffusion $D_{\text{расч.}}$ with the experimental ones $D_{\text{эксп.}}$ ($He - H_2O$ system)

$$D_{AB} = K \cdot \exp^{bt}, \quad (10)$$

где b изменяется в пределах от 0,0195 до 0,0253, а значения K изменяются от $0,787 \cdot 10^{-9}$ до $4,01 \cdot 10^{-9}$ в зависимости от индивидуальных физических свойств диффундирующих молекул газа в воде. Конкретные значения указанных коэффициентов для проанализированных систем газ — жидкость представлены в табл. 1.

Выводы

В заключении отметим, что анализ известных работ по экспериментальному определению коэффициентов диффузии газов в воде показал, что представленные данные имеют расхождение в величинах D_{AB} несмотря на то,

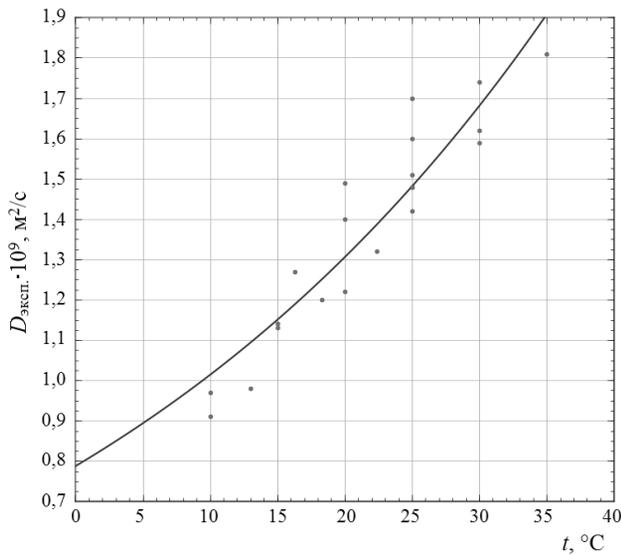


Рис. 5. Зависимость коэффициента молекулярной диффузии от температуры при атмосферном давлении (система $Cl_2 — H_2O$)

Fig. 5. Dependency of the molecular diffusion coefficient on temperature at atmospheric pressure ($Cl_2 — H_2O$ system)

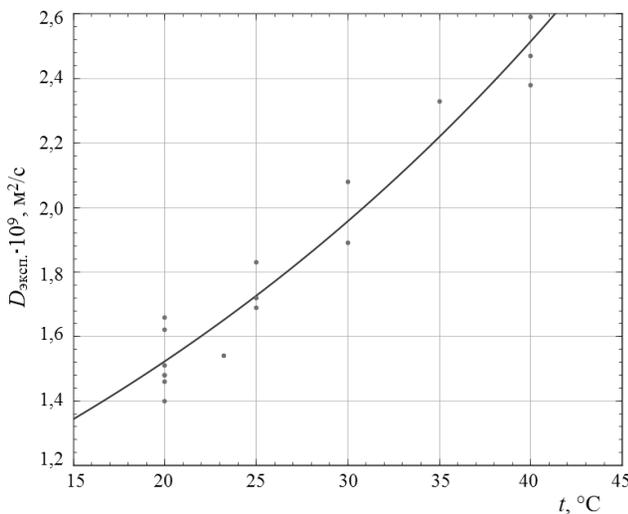


Рис. 7. Зависимость коэффициента молекулярной диффузии от температуры при атмосферном давлении (система $SO_2 — H_2O$)

Fig. 7. Dependency of the molecular diffusion coefficient on temperature at atmospheric pressure ($SO_2 — H_2O$ system)

что они были получены при сравнимых температурах. Объясняется этот факт тем, что исследования были выполнены на различных экспериментальных установках, реализующих оригинальные методики косвенного определения D_{AB} .

В данной работе авторами выполнена обработка опубликованных данных по D_{AB} для семи систем газ — вода и показано, что экспоненциальная зависимость $D_{AB} = f(T)$ наиболее точно описывает эти экспериментальные данные в виде уравнения (10). Определены численные значения коэффициентов K и b для каждой системы.

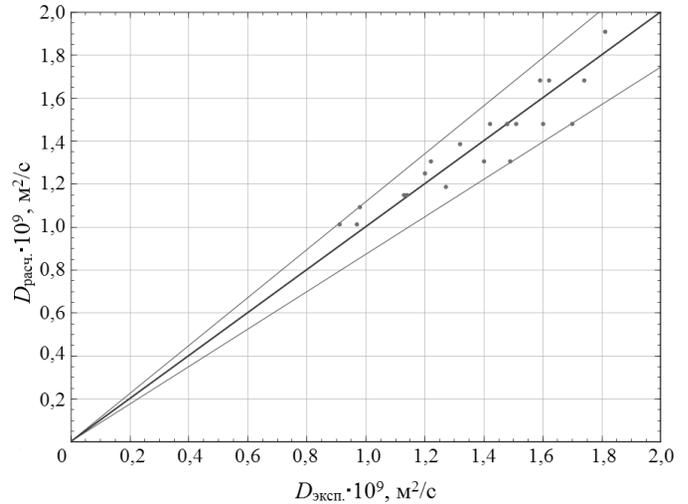


Рис. 6. Сравнение расчетных значений коэффициентов молекулярной диффузии $D_{расч.}$ с экспериментальными $D_{эксп.}$ (система $Cl_2 — H_2O$)

Fig. 6. Comparison of the design values for the coefficient of molecular diffusion $D_{расч.}$ with the experimental ones $D_{эксп.}$ ($Cl_2 — H_2O$ system)

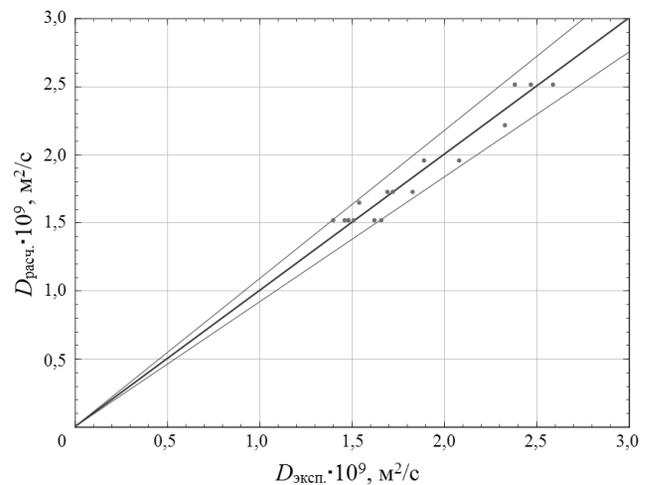


Рис. 8. Сравнение расчетных значений коэффициентов молекулярной диффузии $D_{расч.}$ с экспериментальными $D_{эксп.}$ (система $SO_2 — H_2O$)

Fig. 8. Comparison of the design values for the coefficient of molecular diffusion $D_{расч.}$ with the experimental ones $D_{эксп.}$ ($SO_2 — H_2O$ system)

Полагаем, что величина коэффициента b , учитывая ее небольшое изменение, в основном, определяется молекулярными свойствами воды, тем не менее, определенная вариативность b указывает и на влияние молекулярных свойств газа. Величина коэффициента K , наоборот, в основном, определяется молекулярными свойствами диффундирующего газа и, возможно, воды. Учитывая тот факт, что в большинство известных эмпирических уравнений, полученных для прогнозирования КМД газов в водные растворы различных веществ, входит величина D_{AB} , полученная для чистой воды, то очевидно ее влияние на получаемые результаты расчетов.

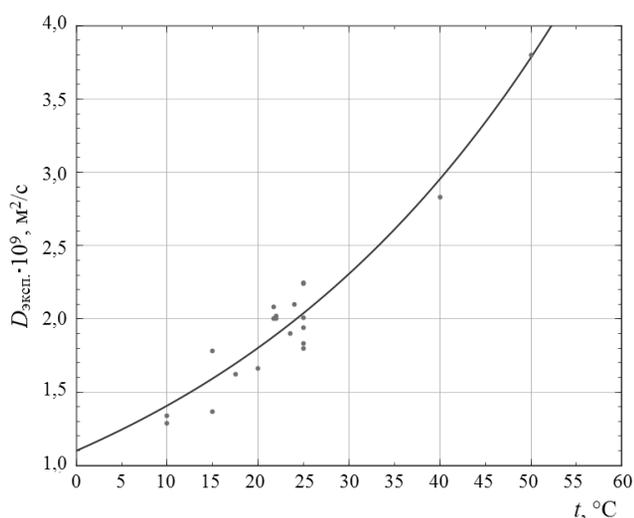


Рис. 9. Зависимость коэффициента молекулярной диффузии от температуры при атмосферном давлении (система $N_2 - H_2O$)

Fig. 9. Dependency of the molecular diffusion coefficient on temperature at atmospheric pressure ($N_2 - H_2O$ system)

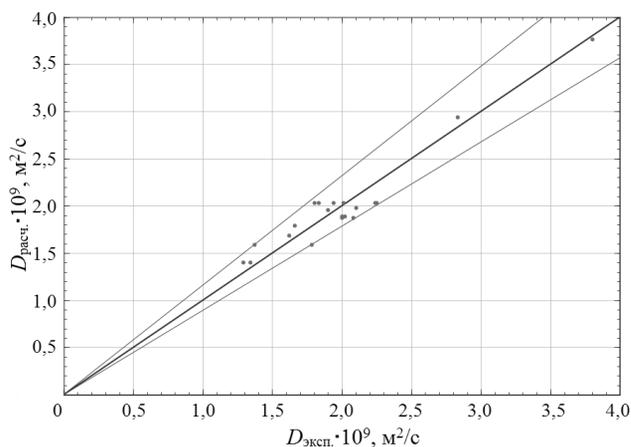


Рис. 10. Сравнение расчетных значений коэффициентов молекулярной диффузии $D_{расч.}$ с экспериментальными $D_{эксп.}$ (система $N_2 - H_2O$)

Fig. 10. Comparison of the design values for the coefficient of molecular diffusion $D_{расч.}$ with the experimental ones $D_{эксп.}$ ($N_2 - H_2O$ system)

Таблица 1

Значения коэффициентов K и b для различных систем газ-жидкость

Table 1

The values of coefficients K and b for various gas-liquid systems

| № п/п | Система газ — жидкость | K | b |
|-------|------------------------|-----------------------|--------|
| 1 | $CO_2 - H_2O$ | $1,09 \cdot 10^{-9}$ | 0,0221 |
| 2 | $O_2 - H_2O$ | $1,214 \cdot 10^{-9}$ | 0,0241 |
| 3 | $H_2 - H_2O$ | $2,54 \cdot 10^{-9}$ | 0,0195 |
| 4 | $He - H_2O$ | $4,01 \cdot 10^{-9}$ | 0,0202 |
| 5 | $Cl_2 - H_2O$ | $0,787 \cdot 10^{-9}$ | 0,0253 |
| 6 | $SO_2 - H_2O$ | $0,921 \cdot 10^{-9}$ | 0,0251 |
| 7 | $N_2 - H_2O$ | $1,096 \cdot 10^{-9}$ | 0,0247 |

Численные значения коэффициентов переноса предполагается использовать для разработок более точных математических зависимостей массообменных процессов, что в конечном итоге позволит подойти к научно-обоснованному проектированию современных энергоэффективных конструкций массообменных аппаратов.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований по определению D_{AB} газов в водных растворах и других неводных растворителях. Предполагается установление общих закономерностей, связывающих КМД, который по определению является коэффициентом молекулярного переноса массы, с аналогичными коэффициентами переноса импульса и тепловой энергии.

Литература

References

1. Лантев А. Г., Фарахов М. И., Минеев Н. Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии. Монография. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. 574 с.
2. Саидакмедова М. Б. Применение уравнений состояния Ван-дер-Ваальсовского типа для описания термодинамических свойств систем вода-углеводород в околокритической и сверхкритической областях // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. № 1 (2). С. 79–85.
3. Замалева З. Х., Шигапова А. И. Диффузия паров водных растворов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 1 (43). С. 164–170.
4. Двоишкин Н. К., Бурханов Р. Н. Особенности самодиффузии в нефти Тульского горизонта Ямашинского месторождения // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2016. № 3. С. 60–66. DOI: 10.31660/0445-0108-2016-3-60-66.
5. Богатырёв А. Ф., Григорьев Е. Б., Макеенкова О. А. Термодиффузия в разреженных трехкомпонентных газовых системах // Научно-технический сборник. Вести газовой науки. 2016. № 4 (28). С. 50–55.
1. Laptev A. G., Farakhov M. I., Mineev N. G. Fundamentals of calculation and modernization of heat and mass transfer units in petrochemistry. Monograph. Kazan: Kazan State Energy University, 2010. 574 p. (in Russian)
2. Saidakhmedova M. B. Application of Van der Waals-type equations of state to describe thermodynamic properties of water-hydrocarbon systems in near-critical and supercritical regions. *Monitoring. Science and technology*. 2010. No. 1 (2). pp. 79–85. (in Russian)
3. Zamaleeva Z. H., Shigapova A. I. Diffusion of vapors of aqueous solutions. *Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2018. No. 1 (43). pp. 164–170. (in Russian)
4. Dvoyashkin N. K., Burkhanov R. N. Features of self-diffusion in the oil of the Tula horizon of the Yamashinsky field. *News of higher educational institutions. Oil and gas*. 2016. No. 3. pp. 60–66. DOI: 10.31660/0445-0108-2016-3-60-66. (in Russian)
5. Bogatyrev A. F., Grigoriev E. B., Makeenkova O. A. Thermodiffusion in sparse three-component gas systems. *Scientific and technical collection. News of gas science*. 2016. No. 4 (28). pp. 50–55. (in Russian)

6. Трофимов В. С., Петров Е. В., Алымов М. И. Сверхглубокое проникание в свете анализа размерностей // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. № 3. С. 1365–1367. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1365-1367.
7. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 10-е изд., стереотипное, доработанное. М.: Альянс, 2004. 753 с.
8. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. Transport Phenomena. 2nd edition. New York: John Wiley & sons, 2002. 895 p.
9. Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell. The Properties of Gases and Liquids. 5th edition. New York: McGraw-Hill Education, 2001. 768 p.
10. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей (определение и корреляция). Л.: Химия, 1971. 704 с.
11. Бретшнейдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. Л.: Химия, 1966. 536 с.
12. Himmelblau D. M. Diffusion of Dissolved Gases in Liquid // Chemical Reviews. 1964. 64 (5). P. 527–550. DOI: 10.1021/cr60231a002
13. Новоселов А. Г., Тишин В. Б., Дужий А. Б. Справочник по молекулярной диффузии в системах газ-жидкость и жидкость-жидкость. В кн.: Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. II. СПб.: Профессионал, 2006. 916 с.
14. Новоселов А. Г., Дужий А. Б., Голикова Е. Ю. Молекулярная диффузия газов в жидкости. 1. Коэффициенты молекулярной диффузии диоксида углерода в воде // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 2. С. 19.
15. Новоселов А. Г., Селиверстова Е. Г., Сорокин С. А., Дужий А. Б. Молекулярная диффузия газов в жидкости. 2. Коэффициенты молекулярной диффузии кислорода в воде // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2020. № 3 (45). С. 21–26. DOI 10.17586/2310-1164-2020-10-3-21-26
16. Jamnongwong M., Loubiere K., Dietrich N., Hebrard G. Experimental study of oxygen diffusion coefficients in clean water containing salt, glucose or surfactant: Consequences on the liquid-mass transfer coefficients. // Chemical Engineering Journal. 2010, v. 165. P. 758–768.
6. Trofimov V. S., Petrov E. V., Alymov M. I. Ultra-deep penetration in the light of dimensional analysis. *Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*. 2016. Vol. 21. No. 3. pp. 1365–1367. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1365-1367. (in Russian)
7. Kasatkin A. G. Basic processes and devices of chemical technology. 10th ed., stereotypical, modified. M.: Alliance, 2004. 753 p. (in Russian)
8. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. Transport Phenomena. 2nd edition. New York: John Wiley & sons, 2002. 895 p.
9. Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell. The Properties of Gases and Liquids. 5th edition. New York: McGraw-Hill Education, 2001. 768 p.
10. Reed R., Sherwood T. Properties of gases and liquids (definition and correlation). L.: Chemistry, 1971. 704 p. (in Russian)
11. Bretschneider S. Properties of gases and liquids. Engineering methods of calculation. L.: Chemistry, 1966. 536 p. (in Russian)
12. Himmelblau D. M. Diffusion of Dissolved Gases in Liquid. *Chemical Reviews*. 1964. 64 (5). P. 527–550. DOI: 10.1021/cr60231a002
13. Novoselov A. G., Tishin V. B., Duzhiy A. B. Handbook of molecular diffusion in gas-liquid and liquid-liquid systems. In: The New Handbook of Chemist and Technologist. Processes and devices of chemical technologies. Part II. St. Petersburg: Professional, 2006. 916 p. (in Russian)
14. Novoselov A. G., Duzhiy A. B., Golikova E. Y. Diffusion of gases in liquids. 1. the molecular diffusion coefficients of carbon dioxide in water. *Scientific Journal of NIU ITMO. Series: Processes and devices of food production*. 2014. No. 2. p. 19. (in Russian)
15. Novoselov A. G., Seliverstova E. G., Sorokin S. A., Duzhiy A. B. Diffusion of gases in liquids. 2. The molecular diffusion coefficients of oxygen in water. *Scientific Journal of NIU ITMO. Series: Processes and devices of food production*. 2020. No. 3 (45). pp. 21–26. DOI 10.17586/2310-1164-2020-10-3-21-26. (in Russian)
16. Jamnongwong M., Loubiere K., Dietrich N., Hebrard G. Experimental study of oxygen diffusion coefficients in clean water containing salt, glucose or surfactant: Consequences on the liquid-mass transfer coefficients. *Chemical Engineering Journal*. 2010, v. 165. P. 758–768.

Сведения об авторах

Новоселов Александр Геннадьевич

Д. т. н., профессор, преподаватель факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, dekrsh@mail.ru

Сорокин Сергей Андреевич

Аспирант, ассистент факультета энергетика и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, sorokinsa@itmo.ru

Баранов Игорь Владимирович

Д. т. н., профессор, директор мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных систем Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ivbaranov@itmo.ru

Дужий Алексей Борисович

К. т. н., старший научный сотрудник ВНИИ Галургии, 190103, Россия, Санкт-Петербург, ул. 10-я Красноармейская, 22, лит. А, Aleksey.Duzhiy@uralkali.com

Information about authors

Novoselov Alexander G.

D. Sc., Professor, teacher of Faculty of Biotechnologies, ITMO University, 9, Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia, dekrsh@mail.ru

Sorokin Sergei A.

Graduate student, assistant of Faculty of Energy and Ecotechnology, ITMO University, 9, Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia, sorokinsa@itmo.ru

Baranov Igor V.

D. Sc., Professor, Director of School of Biotechnology and Cryogenic Systems, ITMO University, 9, Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia, ivbaranov@itmo.ru

Duzhiy Alexey B.

Ph. D., Senior researcher of All-Russian Research Institute of Halurgy, A build., 22, 10th Krasnoarmeyskaya str., St. Petersburg, 190103, Russia, Aleksey.Duzhiy@uralkali.com