

УДК 533.15

DOI 10.18413/2075-4639-2018-50-3-299-307

**СПОСОБ ОПИСАНИЯ ОШИБОК, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ
КОЭФФИЦИЕНТА ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ ГАЗОВ, В НАЧАЛЬНЫЕ
ВРЕМЕНА МЕТОДОМ ОТКРЫТОГО С ОДНОГО КОНЦА КАПИЛЛЯРА****ANALYSIS METHOD ERRORS, THAT OCCUR WHEN MEASURING
THE COEFFICIENT OF MUTUAL DIFFUSION OF GASES, AT THE INITIAL TIME
THE METHOD OPEN AT ONE END OF THE CAPILLARY****А.Т. Кузнецов****A.T. Kuznetsov**

Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
Республика Казахстан, 050043, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71.

Scientifically-research institute of experimental and theoretical physics,
Republic Kazakhstan, 050043, Almaty, av. Al-Faraby, 71.

E-mail: alexkuzn14@mail.ru

Аннотация

При измерениях коэффициентов взаимной диффузии в начальные времена, пока не установилась выбранная система отсчёта (в нашем случае среднеобъёмная система отсчёта, сумма объёмных потоков равна нулю), возникают ошибки при использовании расчётных формул методов. Для анализа полученных результатов воспользовались физико-математической моделью (Гаусса), описывающей случайные величины в выбранном положительном интервале значений, рассматривая полученные эмпирические данные как псевдослучайные величины. Полученный графический результат показал, что в интервале времени, равном 950 с, фронт концентрации изучаемого компонента движется и достигает закрытого торца капилляра (длина капилляра равна 100 см), с коэффициентом диффузии, близким к истинному коэффициенту диффузии. Чтобы оценить время установления среднеобъёмной системы отсчёта, заменили гидродинамический поток, возникающий при бароэффекте, диффузионным (так как по величине они приблизительно равны), со средним значением коэффициента диффузии. Время движения этого диффузионного потока рассчитывается по формуле – решению физико-математической задачи, описывающей случайные величины. Оно оказалось равным 1050 с, а результирующее время, то есть время установления среднеобъёмной системы отсчёта 2000 с, в безразмерном виде 0,23 (критерий диффузионного Фурье). Что хорошо согласуется с графическим анализом эмпирических данных. Расчётными формулами метода в процессе диффузии газов можно воспользоваться после того, как установится выбранная система отсчёта, но для этого необходимо время. В нашем случае это время равно 2000 с, или в безразмерном виде 0,23. Анализ эмпирических данных показал, что коэффициент взаимной диффузии зависит от концентрации в начальные времена.

Abstract

At measuring of coefficients of mutual diffusion, in initial times, while the chosen frame of reference (there is the middle volume frame of reference in our case, the sum of by volume streams is equal to the zero) was not set, there are errors, at the use of calculation formulas of methods. For the analysis of the got results, took advantage of physics and mathematic model (Gausse) describing casual sizes in the chosen positive interval of values, examining the obtained empiric data, as pseudorandom sizes. The got graphic result showed that in a time domain equal 950 s, front of concentration, studied component, moves and arrives at the closed butt end of capillary (length of capillary is equal 100 sm), with the coefficient of diffusion near to the veritable coefficient of diffusion. To estimate time of establishment

of the middle volume frame of reference, replaced a hydrodynamic stream, arising up at baroeffect diffusive (because on a size they are approximately equal), with the mean value of coefficient of diffusion. Time of motion of this diffusive stream, settles accounts on a formula – decision of physics and mathematic task describing casual sizes. It appeared equal 1050 s, and resulting time, idest time of establishment of the middle volume frame of reference 2000 s, in a dimensionless kind 0,23 (criterion of diffusive Fourier).. That well comports with the graphic analysis of empiric data. And so, by the calculation formulas of method, in the process of diffusion of gases, it is possible to avail since the chosen frame of reference will be set, but time is needed for this purpose. In our case this time is equal to 2000 c, or in a dimensionless kind 0,23. The analysis of empiric data showed that the coefficient of mutual diffusion depended on a concentration in initial times

Ключевые слова: статистическая модель, концентрация, истинный коэффициент диффузии.
Keywords: statistical model, the concentration, the coefficient of mutual diffusion.

Введение

Практически во всех известных методах измерения КВД (коэффициента взаимной диффузии) считается, что регулярный режим наступает сразу. Это приводит к возникновению ошибок в начальные времена измерения КВД.

Диффузионная ячейка в методе Лошмидта [1] – представляет собой закрытую на концах трубку, разделённую краном, или каким-либо иным перекрывающим устройством. Трубка устанавливается вертикально, верхняя половина заполняется лёгким газом, а нижняя тяжёлым. Процесс диффузии начинается с момента открытия перекрывающего крана и продолжается в течение фиксируемого момента времени, затем кран закрывается и анализируется средняя концентрация одного из газов в обеих половинах трубки. Метод ясен и прост, отличается хорошей воспроизводимостью данных, однако имеет ряд недостатков, один из которых – большие начальные градиенты концентрации, что приводит в начальные времена к ошибкам при расчётах КВД.

Максвелл в 1860 году рассмотрел диффузию газов через капилляр, соединяющий два сосуда с газами. Спустя много лет этот метод был заново рассмотрен Ноем и Армстедом [2], [3] и получил в научной литературе название двухколбового метода. Сделанные допущения по граничным и начальным условиям при выводе расчётной формулы в начальные времена, приводят к возникновению ошибки при расчётах КВД.

В методе, предложенном Клебановой, Померанцевым и Франк-Каменецким [4] КВД определяется по объёму, диффундировавшего в сферический сосуд газа через капилляр известной длины за измеренный промежуток времени. Этот метод не обладает высокой точностью, поскольку некоторые из полученных значений КВД отличаются друг от друга на 20 % [4]. Это объясняется тем, что не учитывается диффузионное сопротивление шара, и поэтому длина пути диффузии несколько больше. Для этого метода характерны те же проблемы, что и для двухколбового метода.

Метод открытого с одного конца капилляра был предложен Андерсоном и Саддингтоном. В этом методе смесь газов диффундирует из длинного капилляра, закрытого с одного конца, в большой объём растворителя, концентрация в котором практически не меняется со временем [5], [6]. Через определённые промежутки времени открытый конец капилляра перекрывается и состав смеси в нём анализируется в масс-спектрометре. Обычно в этом методе бывает технически сложно добиться выполнения граничных условий, а также большая длина диффузии предполагает не мгновенное выполнение граничных условий, в связи с чем возникают ошибки в начальные времена, при расчётах КВД.

Так как измеренные данные в начальные времена не подчиняются законам используемых моделей, то для анализа возникающих ошибок, возможно, поможет статистика, а именно нормальное распределение, или распределение Гаусса. Применительно к исследуемой задаче

можно использовать нормальное распределение как способ моделирования нормальных псевдослучайных величин, основываясь на центральной предельной теореме [7], [8].

Объекты и методы исследования

Метод описания ошибок

Для анализа процессов, протекающих в начальные времена в диффузионной ячейке метода открытого с одного торца капилляра [9], т. е. пока не установится среднеобъёмная система отсчёта $\sum_{i=1}^n X_i * V_i = 0$ (суммарный поток парциальных объёмов V_i равен нулю) [10], можно построить физико-статистическую модель, считая измеряемые величины псевдослучайными, в этом случае можно воспользоваться задачей для полуограниченного тела [11].

Постановка задачи. Концентрация в полуограниченном пространстве в начальный момент времени во всех точках имеет определённое значение, то есть $X_i(x, 0) = X_{i0}$. Решается одномерная задача о распределении концентрации одного из компонентов в процессе диффузии в среднеобъёмной системе отсчёта.

Задачу математически можно сформулировать следующим образом

$$\frac{\partial X_i(x, t)}{\partial t} = D_{ij} * \frac{\partial X_i(x, t)}{\partial x}, \quad (t > 0, 0 < x < \infty). \tag{1}$$

При краевых условиях

$$X_i(x, 0) = X_{i0}, \tag{2}$$

$$X_i(0, t) = 0, \tag{3}$$

$$\frac{\partial X_i(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \tag{4}$$

где x – пространственная координата, ось которой направлена к закрытому торцу капилляра, t – время процесса диффузии.

Решение этой задачи имеет вид [11]

$$X_i(x, t) = X_{i0} * \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 * \sqrt{D_{ij} * t}} \right). \tag{5}$$

Для другого диффундирующего компонента концентрация $X_{i+1}(x, t)$ запишется в виде

$$X_{i+1}(x, t) = 1 - X_{i0} * \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 * \sqrt{D_{ij} * t}} \right), \tag{6}$$

где X_{i0} – начальная концентрация i -го компонента смеси.

Так как в эксперименте измеряется средняя по длине капилляра концентрация $\bar{X}_i(t)$, необходимо проинтегрировать выражение (6) по длине капилляра. В связи с трудностями интегрирования функции ошибок Гаусса можно воспользоваться разложением её в ряд, для малых и больших значений аргумента [11]. При этом получим два знакопеременных ряда, имеющих сходимости (первый $X_{i+1}(x, t) \xrightarrow{x \rightarrow 0} 1$, а второй $X_{i+1}^*(x, t) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 1 - X_{i0}$).

$$X_{i+1}(x,t) = 1 - X_{i0} * \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \sum_{n=0}^k \frac{(-1)^n * u^{2*n+1}}{n! * (2*n+1)}, \quad (7)$$

где k – нечётное число членов ряда и $u = \frac{x}{2 * \sqrt{D_{ij} * t}}$, ($0 \leq u \leq 1$).

$$X_{i+1}^*(x,t) = 1 - X_{i0} * \left(1 - \frac{e^{-u^2}}{\sqrt{\pi}} * \sum_{n=0}^k \frac{(-1)^n * (2*n)!}{n! * 2^{2*n} * u^{2*n+1}} \right), \quad (8)$$

для интервала значений ($1 \leq u \leq u^*$), где u^* есть то значение аргумента, при котором

$$X_{i+1}^*(x,t) = 1 - X_{i0}.$$

Интегрируя выражения (7), (8) и учитывая, что аргумент u имеет один и тот же переходящий предел интегрирования, равный 1, получим выражение для площади под кривой ($X_{i+1} = f(x,t)$ и $X_{i+1}^* = f(x,t)$)

$$S_1(x,t) = 2 * \sqrt{D_{ij} * t} * X_{i0} * \left[u_0 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} * \sum_{n=0}^k \frac{(-1)^n * u_0^{2*(n+1)}}{n! * (2*n+1) * (n+1)} \right], \quad (9)$$

где $u_0 = 1$.

$$S_2(x,t) = 2 * \sqrt{D_{ij} * t} * X_{i0} * \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} * \left(e^{-u_0^2} - e^{-u^{*2}} \right) + \left(u^* * \operatorname{erfc}(u^*) - u_0 * \operatorname{erfc}(u_0) \right) \right], \quad (10)$$

где

$$\operatorname{erfc}(u) = \frac{e^{-u^2}}{\sqrt{\pi}} * \sum_{n=0}^k \frac{(-1)^n * (2*n)!}{n! * 2^{2*n} * u^{2*n+1}}. \quad (11)$$

Отсюда для средней концентрации по длине капилляра имеем следующее выражение

$$\bar{X}_i(t) = 1 - X_{i0} + \frac{1}{L} * (S_1 + S_2), \quad (12)$$

где $\bar{X}_i(t)$ – средняя по длине капилляра концентрация.

Результаты и их обсуждение

Средняя концентрация измерялась на установке, используемой в методе открытого с одного конца капилляра [9]. Для анализа использовали 5-7 точек. В качестве объекта исследования была использована система газов He-Ag при комнатной температуре и атмосферном давлении. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Здесь в верхней колонке таблицы – средняя концентрация He (гелия) в процентах, а в нижней – время её регистрации в секундах.

Таблица 1

Table 1

Зависимость средней концентрации $\bar{X}_i(t)$ от времени t

Dependence of average concentration $\bar{X}_i(t)$ on time t

$\bar{X}_{\text{He}}(t), \%$	90,1	90,2	90,6	91,0	91,3	91,4	91,5
$t, \text{с} (t, \text{s})$	121,6	190,1	389,7	673,5	851,8	929,5	1036,8

Анализ экспериментальных данных осуществлялся на физико-статистической модели – диффузия в полуограниченном теле.

Для этого рассчитывали концентрацию $X_i(x, t)$ по формулам (7) и (8). При фиксированных значениях коэффициента диффузии D и времени диффузии t получается массив расчётных данных $X_{i+1} = f(x)$, из него находили то расстояние x^* , при котором $X_{i+1}^*(x, t) = 1 - X_{i0}$ с точностью до десятых долей процента, и $X_{i+1}^0(x, t)$, при котором $u = 1$. Зная пределы интегрирования, по формулам (9), (10), (11), (12) находили среднюю концентрацию $\bar{X}_i(t)$ для данного момента времени. Задавая различные значения коэффициентам диффузии, для различных значений времени t получали массив расчётных данных, с помощью которого аппроксимировали экспериментальные данные.

В таблице 2 представлен массив данных, рассчитанный по формулам (9), (10), (11), (12) для системы газов He-Ar.

Таблица 2
Table 2

Вычисленная по расчётным формулам физико-статистической модели диффузии, средняя концентрация $\bar{X}_i(t)$ по времени процесса диффузии t при заданных значениях коэффициента диффузии и начальной концентрации $X_{He0} = 89,3\%$

Calculated, according to the calculation formulas of the physical and statistical model of diffusion, of the average concentration $\bar{X}_i(t)$ over time of the diffusion process t , for given values of the diffusion coefficient and initial concentration $X_{He0} = 89,3\%$

$D = 0,9 \text{ см}^2/\text{с}$ ($D = 0,9 \text{ см}^2/\text{с}$)	$\bar{X}_{He}(t), \%$	89,9	90,0	90,4	90,5	91,1
	$t, \text{с}$ ($t, \text{с}$)	121	190	390	650	1040
	$x^*, \text{см}$ ($x^*, \text{см}$)	30,1	38,5	54,4	70,6	88,8
$D = 0,95 \text{ см}^2/\text{с}$ ($D = 0,95 \text{ см}^2/\text{с}$)	$\bar{X}_{He}(t), \%$	89,9	90,0	90,4	90,8	91,1
	$t, \text{с}$ ($t, \text{с}$)	121	190	390	650	1040
	$x^*, \text{см}$ ($x^*, \text{см}$)	31,0	39,5	57,3	73,7	94,6
$D = 1,1 \text{ см}^2/\text{с}$ ($D = 1,1 \text{ см}^2/\text{с}$)	$\bar{X}_{He}(t), \%$	89,9	90,1	90,5	90,8	91,3
	$t, \text{с}$ ($t, \text{с}$)	121	190	390	650	1040
	$x^*, \text{см}$ ($x^*, \text{см}$)	33,3	42,1	60,0	77,2	97,0
$D = 1,15 \text{ см}^2/\text{с}$ ($D = 1,15 \text{ см}^2/\text{с}$)	$\bar{X}_{He}(t), \%$	89,9	90,1	90,5	90,8	91,3
	$t, \text{с}$ ($t, \text{с}$)	121	190	390	650	1040
	$x^*, \text{см}$ ($x^*, \text{см}$)	34,0	43,1	61,5	79,2	99,8
$D = 1,3 \text{ см}^2/\text{с}$ ($D = 1,3 \text{ см}^2/\text{с}$)	$\bar{X}_{He}(t), \%$	90,1	90,2	90,6	91,0	91,4
	$t, \text{с}$ ($t, \text{с}$)	121	190	390	650	950
	$x^*, \text{см}$ ($x^*, \text{см}$)	36,3	45,7	65,4	83,1	100

Результаты сравнения средних концентраций, измеренных в эксперименте, с расчётными значениями средних концентраций приведены на рисунке 1.

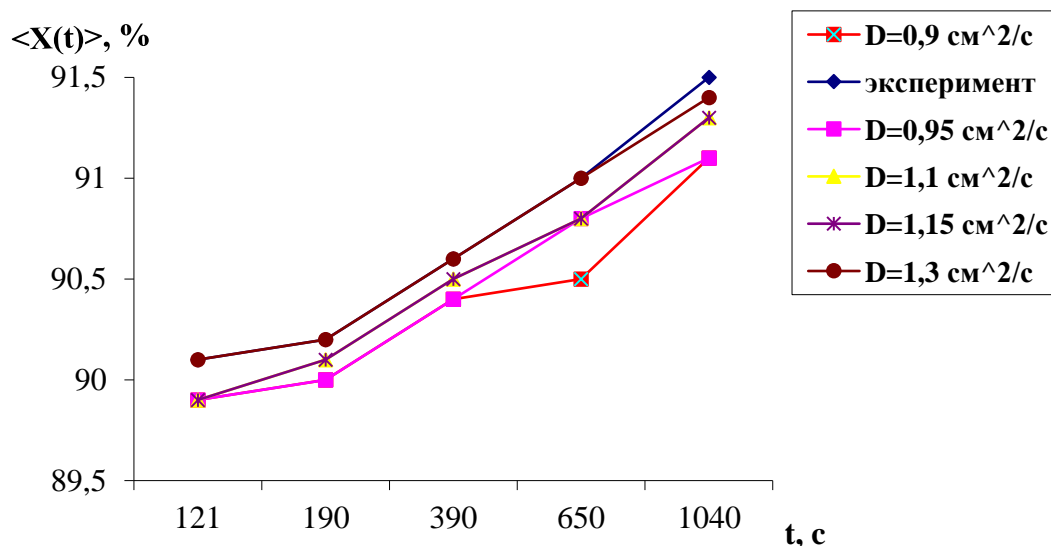


Рис. 1. Сравнение расчётных зависимостей концентрации от времени при различных значениях коэффициента диффузии с экспериментальной зависимостью концентрации от времени

Fig. 1. Comparison of the calculated dependences of the concentration on time, for different values of the diffusion coefficient, with the experimental dependence of the concentration on time

Наиболее хорошо совпадает с экспериментальной кривая, рассчитанная для коэффициента диффузии, равного истинному коэффициенту диффузии гелия $D = 1,3 \text{ cm}^2/\text{c}$ [12], [13]. Зная коэффициент диффузии, можно по таблице 2 найти время, за которое фронт концентрации достигнет закрытого торца капилляра, при $D = 1,3 \text{ cm}^2/\text{c}$ это время равно 950 с.

Следовательно, формирование диффузионного бароэффекта, а вместе с ним компенсирующего гидродинамического потока (вследствие разности давления Δp на концах диффузионного капилляра) произойдёт не ранее, чем через $t_1 = 950 \text{ c}$. Так как гидродинамический поток для бинарных смесей по величине равен диффузионному [14], можно представить гидродинамический поток диффузионным с коэффициентом диффузии, рассчитанным по формуле, при этом концентрации необходимо брать для момента времени $t_1 = 950 \text{ c}$, а коэффициенты диффузии приводить к нормальным условиям [13]

$$\begin{aligned}
 D_{12} &= X_1^v * D_1 * \left(\frac{T_{\text{таб}}}{T_0} \right)^n + X_2^v * D_2 * \left(\frac{T_{\text{таб}}}{T_0} \right)^n = \\
 &= 0,914 * 1,383 * \left(\frac{292,4}{293,16} \right)^{1,75} + 0,096 * 0,18 * \left(\frac{295}{293,16} \right)^{1,75} = 1,28 \text{ cm}^2/\text{c}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Расчёт коэффициента диффузии по формуле (10) даёт величину, равную $D_{12} = 1,28 \text{ cm}^2/\text{c}$ для данного интервала концентраций.

На рисунке 2 представлены данные в виде точек, полученные в результате выполнения эксперимента на установке метода открытого с одного конца капилляра, для системы газов He-Ar. Прямая линия есть результат обработки экспериментальных точек, заданных полулогарифмической зависимостью, которые лежат во временном интервале, начиная с 2500 с, методом наименьших квадратов.

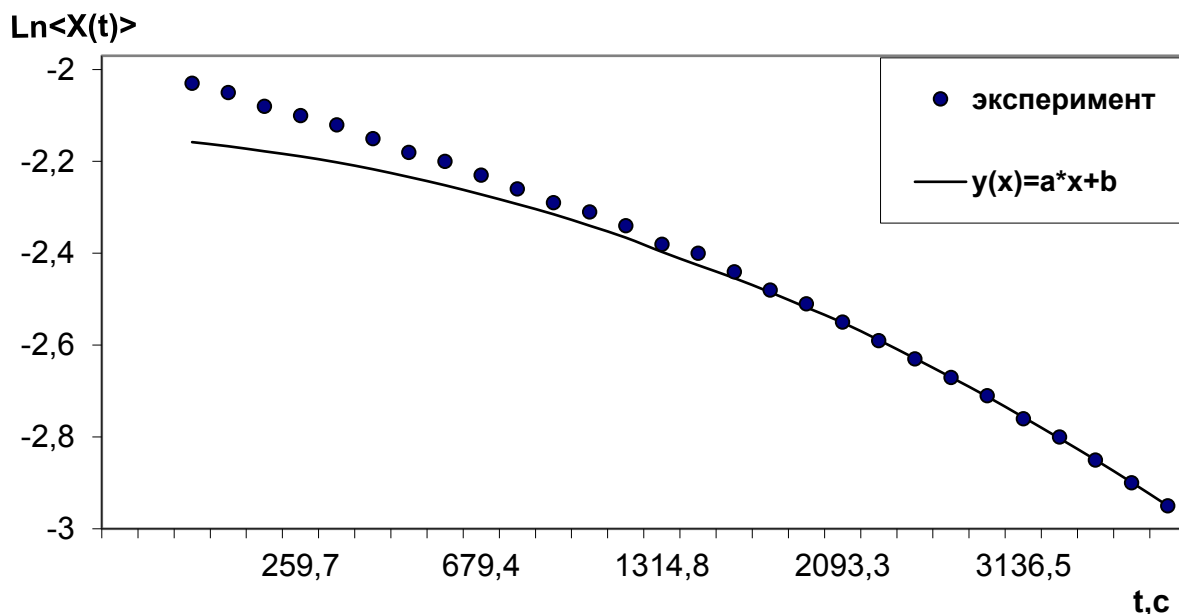


Рис. 2 Сравнение экспериментальных значений, измерения логарифма средней концентрации со временем, с расчётными
 Fig. 2 Comparison of experimental values, measurement of the logarithm of mean concentration with time, with calculated

Анализ рисунка 2 показывает, что экспериментальные точки хорошо совпадают с прямой в интервале времени выше 2000 с, полученной обработкой экспериментальных данных методом наименьших квадратов [15]. По тангенсу угла наклона определяют величину коэффициента диффузии, в методе открытого с одного конца капилляра [9] эта величина оказалась равной величине коэффициента взаимной диффузии $D_{12} = 0,75 \text{ см}^2/\text{с}$, для системы газов He-Ar. Изучение рисунка 2 позволяет говорить о возможной зависимости коэффициента диффузии от концентрации исследуемого компонента смеси газов, поэтому необходимо брать среднее значение коэффициента диффузии для расчёта времени наступления регулярного режима. Среднее значение будет равно $\bar{D}_{12} = 0,5 * (0,75 + 1,28) = 1,01 \text{ см}^2/\text{с}$, то по расчётным формулам физико-статистического метода (9), (10), (11), (12) найдём время прохождения диффузионного пути, для $L = 100 \text{ см}$ оно будет равно $t_2 = 1050 \text{ с}$. Тогда время наступления регулярного режима будет равно $t = t_1 + t_2 = 950 + 1050 = 2000 \text{ с}$.

Заключение

В этой работе показано, что в начальные моменты времени, когда процесс диффузии ещё не привёл к формированию диффузионного бароэффекта и выравнивающего гидродинамического потока, то есть пока не установилась среднеобъёмная система отсчёта, необходимо диффузионную ячейку рассматривать как полуограниченное тело и использовать расчётную формулу для физико-статистической модели.

Метод подбора показал, что в начальные моменты времени коэффициент диффузии оказался близким к истинному коэффициенту диффузии.

При бароэффекте гидродинамический поток по величине соответствует диффузионному потоку, для бинарных смесей. Тогда мы можем оценить время установления



среднеобъёмной системы отсчёта – оно будет равно времени, затрачиваемому на диффузионный и гидродинамический путь фронта концентрации $t = 2000 \text{ с}$, что хорошо согласуется с аналитическими данными, полученными из анализа рисунка 2. $t = 2000 \text{ с}$. Используя расчётные величины – коэффициенты диффузии, время, можно рассчитать безразмерное время наступления регулярного режима – диффузионный критерий Фурье, он будет равен 0,23.

Анализ рисунка 2 позволяет сделать предположение о зависимости коэффициента взаимной диффузии от концентрации, в начальной стадии диффузии, в методе открытого с одного конца капилляра.

Список литературы References

1. Жаврин Ю.И., Косов Н.Д., Новосад З.И. 1977. Исследование диффузии в двух и многокомпонентных газовых смесях методом Лосмидта. Прикладная и теоретическая физика. Алма-Ата: Казахский госуниверситет, вып. 10: 68–70.

Zhavrin Y.I., Kosov N.D., Novosad Z.I. 1977. Study of diffusion in two and multicomponent gas mixtures by the Loschmidt method. Applied and theoretical physics. Alma-Ata: Kazakh State University, publication 10: 68–70.

2. Andrew S.P.S. 1955. A simple method of measuring gaseous diffusion coefficient. Chem. Eng. Sci., 4: 269–272.

3. Карпушин А.Г., Биболов Ш.К. 1982. Коэффициенты взаимной диффузии гелия и двуокиси углерода при различных давлениях и температурах. Теплофизические свойства веществ и материалов, М.: ГССД: 43–52.

Karpushin A.G., Bibolov Sh.K. 1982. Coefficients of mutual diffusion of helium and carbon dioxide at various pressures and temperatures. Thermophysical properties of substances and materials, M.: GSSD: 43–52.

4. Бережной А.Н., Семёнов А.В. 1986. Экспериментальные методы определения КВД газовой фазы, М.: Изд. Стандартов, 32 с.

Berezhnoy A.N., Semenov A.V. 1986. Experimental methods for determining the CMD of the gas phase, M.: Publication. Standards, 32 p.

5. Anderson J.S. and Saddington K. 1949. The use of radioactive isotopes in the study of the diffusion of ions in solution. J. Chem. Soc. Suppl., 381 p.

6. Безверхий П.Л., Матизен Э.В. 1980. Коэффициенты взаимной диффузии в плотных газовых растворах D_2 - ^4He при низких температурах. Теплофизические свойства веществ и материалов, ГССД, вып. 17: 64–75.

Bezverhiy P.P., Matizen E.V. 1980. Thermophysical properties of substances and materials GDSN. Higher education, 17: 64–75.

7. Вентцель Е. С. 2005. Теория вероятностей, 10-е изд., стер. М.: «Академия», 576 с. ISBN 5-7695-2311-5.

Ventzel E.S. 2005. Theory of Probability. - 10th publication., Sr. - Moscow: "Academy", 576 p. ISBN 5-7695-2311-5.

8. Сенатов В.В. 2018. Центральная предельная теорема. Точность аппроксимации и асимптотические разложения, М.: Изд. URSS, 352 с. ISBN 978 -5-397-060006.

Senatov V. V. 2018. Central limit towers. The accuracy of the approximation and asymptotic expansions, M.: Publishing House. URSS, 352 p. ISBN 978 -5-397-06

9. Косов Н.Д., Волошин Ю.Е., Поярков И.В. 1990. Измерение коэффициентов взаимной диффузии газов методом регулярного режима. Криокристаллы и диффузия. Материалы семинара – совещания. Алма – Ата: 15–20.

Kosov N.D., Voloshin U.E., Poyarkov I.V. 1990. Cryocrystals and diffusion. Workshop materials - meetings. Alma-Ata: 15–20.

10. Франк – Каменецкий Д.А. 2008. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике: Учебник монография / Д.А. Франк – Каменецкий, - 4-е изд. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 408 с. ISBN 978-5-91559-004-4.

Frank – Kamenetsky D. A. 2008. Fundamentals of Macrokinetics. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics: a Textbook monograph /D. A. Frank – Kamenetsky, 4th ed. – Dolgoprudny: Publishing house "Intellect", 408 p. ISBN 978-5-91559-004-4.

11. Лыков А.В. 1967. Теория теплопроводности, М.: Изд. «Высшая школа», 599 с.

Lykov A.V. 1967. Theory of heat conductivity, M.: High school., 599 p.

12. Косов Н.Д. 1982. Коэффициенты диффузии газов в различных системах отсчета. Теплофизические свойства веществ и материалов /ГСССД, вып.17: 52–63/ Физические константы и свойства веществ/

Kosov N.D. 1982. Gas diffusion coefficients in different reference systems. Thermophysical properties of substances and materials / GSSSD, issue 17: 52–63 / Physical constants and properties of substances /

13. Варгафтик Н.Б. 1972. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2 – издание. М.: Наука: 640–650.

Vargaftik N.B. 1972. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. 2-edition. M.: Nauka, 652 p.

14. Альжанов К.З. 2001. Исследование диффузионного бароэффекта бинарных смесей в широком интервале температур. Теплофизические измерения в начале XXI века: IV Междунар. теплофиз. школа, 24–28 сент., Тамбов: 51–52.

Alzhanov K.Z. 2001. Investigation of the diffusion baroeffect of binary mixtures in a wide temperature range. Thermophysical measurements at the beginning of the XXI century: IV Intern. thermophys. school, 24-28 Sept., Tambov: 51–52.

15. Kosov N.D., Kuznetsov A. T. 2018. The error, caused by initial diffusion stadium for magnitude of mutual diffusion coefficient, measured by method of one end open capillary. Modern science, №4: 61–63.