

УДК 533.15

DOI 10.18413/2075-4639-2018-50-4-442-451

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ  
ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ В НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЦЕССА****STUDY OF DEPENDENCE OF COEFFICIENT OF DIFFUSION FROM  
CONCENTRATION IN THE INITIAL STAGE OF PROCESS****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**

В этой работе изучается начальная стадия диффузии на установке метода открытого с одного конца капилляра, где при анализе экспериментальных данных была обнаружена зависимость коэффициента взаимной диффузии от концентрации и аномально большие коэффициенты взаимной диффузии. Так как метод открытого с одного конца капилляра имеет математические ограничения для использования расчётной формулы в начальные времена, то была построена математическая модель, в которой коэффициент взаимной диффузии зависит от концентрации. Расчёты коэффициентов взаимной диффузии были произведены по математическим формулам, полученной модели, а необходимые параметры для расчётов из эксперимента. Полученную зависимость коэффициента взаимной диффузии от концентрации аппроксимировали полиномом шестой степени. Технически такая полиномиальная зависимость необходима для предотвращения ошибок, которые будут возникать при анализе газов, или смеси газов в газоанализаторах, которые получили широкое применение во многих сферах промышленности. При анализе результатов выявлены аномально высокие коэффициенты взаимной диффузии в начальные времена. Анализ аномалии показал, что такая динамика развития процесса диффузии возможна в мнимой точке диффузионной длины, превышающей размер диффузионной ячейки в 2,474 раза.

**Abstract**

In this work the initial stage of diffusion is studied on setting of method of open from one end capillary, where at the analysis of experimental data was found out dependence of coefficient of mutual diffusion on a concentration and anomalously large coefficients of mutual diffusion. Because the method of open from one end capillary has mathematical limitations for the use of calculation formula in initial times, then a mathematical model in that the coefficient of mutual diffusion depends on a concentration was built. The calculations of coefficients of mutual diffusion were produced on mathematical formulas, got model, and necessary parameters for calculations from an experiment. The dependence of the coefficient of mutual diffusion of the concentration was approximatively by a polynomial of the sixth degree. Technically such polynomial dependence is needed for prevention of errors, that will arise up at the analysis of gases, or mixture of gases in gas analyzers that got a wide use in many spheres of industry. At the analysis of results the high coefficients of mutual diffusion are educed anomalously in initial times. The analysis of anomaly showed that such dynamics of development of process of diffusion is possible in the imaginary point of diffusive length, exceeding the size of diffusive cell in 2,474 time.

**Ключевые слова:** коэффициент взаимной диффузии, концентрация, диффузионный капилляр, диффузионная длина, диффузионная аномалия.

**Keywords:** coefficient of mutual diffusion, concentration, diffusive capillary, diffusive length, diffusive anomaly

### Введение

Во всех известных способах измерения коэффициента взаимной диффузии (КВД), считается, что сразу наступает регулярный режим и можно пользоваться формулой метода. На самом деле, всё зависит от размера диффузионного пути. Если диффузионный путь небольшой, всего несколько сантиметров, то исследователь, по результатам измерения концентрации газа, может не заметить физического явления, протекающего в диффузионной ячейке в начальный момент времени, а возникающую погрешность в начальной стадии диффузии можно объяснить погрешностью метода измерения концентрации газа или приборной погрешностью, которая проявляет себя по максимуму в начале шкалы прибора, измеряющего концентрацию газа. Для того, чтобы увидеть физические явления, протекающие в начальной стадии диффузии, необходимо растянуть диффузионный путь диффундирующего газа или смеси газов, это можно осуществить элементарным увеличением размера диффузионной ячейки в направлении диффузии изучаемого газа или смеси газов. Такая модель растянутого по времени диффузионного пути осуществлена в методе открытого с одного конца капилляра [1], [2], в котором процесс диффузии по времени растянут в 324 раза, но математической моделью метода можно пользоваться только при наступлении регулярного режима  $F_0 > 0,2$ , т. е. расчётной формулой можно воспользоваться по прошествии безразмерного времени диффузии равного 0,2 [3].

Анализ результатов измерения коэффициентов взаимной диффузии в начальные времена на установке метода открытого с одного конца капилляра показал, что в начальные времена, когда ещё не установилась среднеобъёмная система отсчёта, измеряемые коэффициенты диффузии, по одиночным измерениям [3], зависят от концентрации изучаемого газа или смеси газов. Для описания явления, протекающего в начальной стадии диффузии, с учётом зависимости коэффициентов диффузии от концентрации изучаемого газа или смеси газов необходима физико-математическая модель, которая опишет изучаемое явление. В этом случае необходимо решить дифференциальное уравнение – закон Фика второго рода при условии зависимости коэффициента диффузии от концентрации, с граничными и начальным условием метода открытого с одного конца капилляра [4]. Анализ полученного решения можно осуществить на графике зависимости коэффициента взаимной диффузии от концентрации. Расчётная формула метода, предложенного ниже, не поддаётся простым математическим преобразованиям и упрощениям. Поэтому экспериментальную зависимость, на графике, коэффициента взаимной диффузии от концентрации можно аппроксимировать полиномом, математическая формула которого и будет искомым уравнением зависимости коэффициента взаимной диффузии от концентрации.

### Теория метода

Для решения поставленной задачи необходимо найти математическую модель, которая могла бы хорошо описывать процессы, протекающие в начальные времена на установке открытого с одного конца капилляра с учётом зависимости коэффициента взаимной диффузии от концентрации. В общем случае эта физико-математическая модель – вращающийся сосуд с ограниченными размерами, но с предполагаемой зависимостью коэффициента диффузии от концентрации. До сих пор считалось, что задача такой сложности не решается аналитически [5]

$$\frac{\partial v_i(\vec{r}, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \vec{r}} * \left( \frac{D_{ij}(v_i) * \partial v_i(\vec{r}, t)}{\partial \vec{r}} \right), \tag{1}$$

$v_i(\vec{r}, t)$  – парциальный объём  $i$  – го компонента,  $\vec{r}$  – радиус вектор,  $t$  – время.

$$v_i(\vec{r}, t) \Big|_{t=0} = v_{i0} \quad (2)$$

– закон распределения вещества в начальный момент времени.

$$v_i(\vec{r}, t) \Big|_S = 0 \quad (3)$$

– условие вращения сосуда (капилляра),  $S$  – поверхность, связанная с открытым торцом капилляра, которую пересекают потоки газов.

$$\frac{\partial v_i(\vec{r}, t)}{\partial \vec{n}} \Big|_S = 0 \quad (4)$$

– условие непроницаемости стенки сосуда (капилляра),  $\vec{n}$  – нормаль к поверхности  $S$ .

Из определения диффузии (взаимное проникновение одного газа в другой) следует, что оба потока газа пересекут не только площадку  $S$ , но и систему координат, расположенную осью  $x$  вдоль оси диффузионного сосуда в точке начала координат.

Поэтому площадку  $S$  в граничных условиях первого рода можно заменить радиус вектором в начале координат, это не повлияет на физический смысл задачи, но упростит её математически. Граничные условия второго рода можно выразить через радиус вектор, имея в виду то, что угол между нормалью и радиус вектором будет равен нулю при распространении фронта концентрации в виде сферической волны вдоль оси диффузионного сосуда, где радиус вектор и нормаль будут совпадать не только направлением, но и одинаковыми значениями в начале системы координат [6].

Перейдем к объёмной концентрации [7]

$$C_i(\vec{r}, t) = \frac{v_i(\vec{r}, t)}{\sum_i v_i(\vec{r}, t)} \quad (5)$$

С учётом формулы (5) перепишем уравнение (1), в следующем виде

$$\frac{\partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \vec{r}} * \left( \frac{D_{ij}(C_i) * \partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial \vec{r}} \right) \quad (6)$$

С учётом изложенного выше, начальные и граничные условия будут иметь вид

$$C_i(\vec{r}, t) \Big|_{t=0} = C_{i0} \quad (7)$$

– закон распределения вещества в начальный момент времени.

$$C_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r}=0} = 0 \quad (8)$$

– условие вращения сосуда (капилляра).

$$\frac{\partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial \vec{r}} \Big|_{\vec{r}=0} = 0 \quad (9)$$

– условие непроницаемости стенки сосуда (капилляра).

Так как одна часть уравнения дифференцируется по времени, а другая – по координате, то можно предположить, что обе части уравнения равны некоторой постоянной  $Const$ . Решение представим в виде

$$\frac{\partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \vec{r}} * \left( \frac{D_{ij}(C_i) * \partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial \vec{r}} \right) = Const \quad (10)$$

Тогда уравнение (10) можно разбить на два уравнения

$$\frac{\partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial t} = \text{Const}, \tag{11}$$

$$\frac{\partial}{\partial \vec{r}} * \left( \frac{D_{ij}(C_i) * \partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial \vec{r}} \right) = \text{Const}. \tag{12}$$

Уравнение (11) можно преобразовать и проинтегрировать

$$C_i(\vec{r}, t) = \text{Const} * t + c_1. \tag{13}$$

Константу  $c_1$  найдём из начального условия (8)

$$c_1 = C_{i0}. \tag{14}$$

Уравнение (13) можно переписать в следующем виде

$$C_i(\vec{r}, t) = \text{Const} * t + C_{i0}. \tag{15}$$

Уравнение (12) проинтегрируем и получим [8]

$$\frac{D_{ij}(C_i) * \partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial \vec{r}} = \text{Const} * \vec{r} + c_2. \tag{16}$$

Преобразуем уравнение (16) к виду

$$\frac{\partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial \vec{r}} = \frac{\text{Const}}{D_{ij}(C_i)} * \vec{r} + \frac{c_2}{D_{ij}(C_i)}. \tag{17}$$

Проинтегрируем уравнение (17), получим

$$C_i(\vec{r}, t) = \frac{\text{Const}}{2 * D_{ij}(C_i)} * \vec{r}^2 + \frac{c_2}{D_{ij}(C_i)} * \vec{r} + c_3. \tag{18}$$

Путём несложных преобразований получим уравнение для Const

$$\text{Const} = \frac{2 * D_{ij}(C_i)}{\vec{r}^2} * \left( C_i(\vec{r}, t) - \frac{c_2}{D_{ij}(C_i)} * \vec{r} - c_3 \right). \tag{19}$$

И общее решение будет выглядеть следующим образом

$$C_i(\vec{r}, t) = \frac{2 * D_{ij}(C_i) * t}{\vec{r}^2} * \left( C_i(\vec{r}, t) - \frac{c_2}{D_{ij}(C_i)} * \vec{r} - c_3 \right) + C_{i0}. \tag{20}$$

Преобразуем уравнение (20)

$$C_i(\vec{r}, t) = \frac{2 * D_{ij}(C_i) * t}{\left( 1 - \frac{2 * D_{ij}(C_i) * t}{\vec{r}^2} \right)} * \left( \frac{c_2}{D_{ij}(C_i)} * \vec{r} + c_3 \right) + \frac{C_{i0}}{\left( 1 - \frac{2 * D_{ij}(C_i) * t}{\vec{r}^2} \right)}. \tag{21}$$

Применим граничные условия 1-го и 2-го рода к решению (21), найдём  $c_3$  из граничных условий 1-го рода [8]

$$c_3 = 0, \tag{22}$$

$c_2$  из граничных условий 2-го рода

$$c_2 = 0. \quad (23)$$

При условии зависимости  $D(C)$ , решение уравнения (6) имеет вид

$$C_i(\bar{r}, t) = \frac{C_{i0}}{\left(1 - \frac{2 * D_{ij}(C_i) * t}{\bar{r}^2}\right)}. \quad (24)$$

Если воспользоваться безразмерным временем – диффузионным критерием Фурье [9]

$$F_0 = \frac{D_{ij}(C_i) * t}{\bar{r}^2}, \quad (25)$$

то формула (24) примет упрощённый вид

$$C_i(\bar{r}, t) = \frac{C_{i0}}{(1 - 2 * F_0)}. \quad (26)$$

Но так как для исследования необходима зависимость коэффициента взаимной диффузии от концентрации, то можно преобразовать формулу (24)

$$D_{ij}(C_i) = \frac{\bar{r}^2}{2 * t} * \frac{C_i(\bar{r}, t) - C_{i0}}{C_i(\bar{r}, t)}. \quad (27)$$

Уравнение (27) в графическом виде представлено на рисунке 1 в точке L, соответствующей длине капилляра, где концентрация получена из эксперимента для системы газов He-Ar на диффузионной ячейке метода открытого с одного конца капилляра [4].

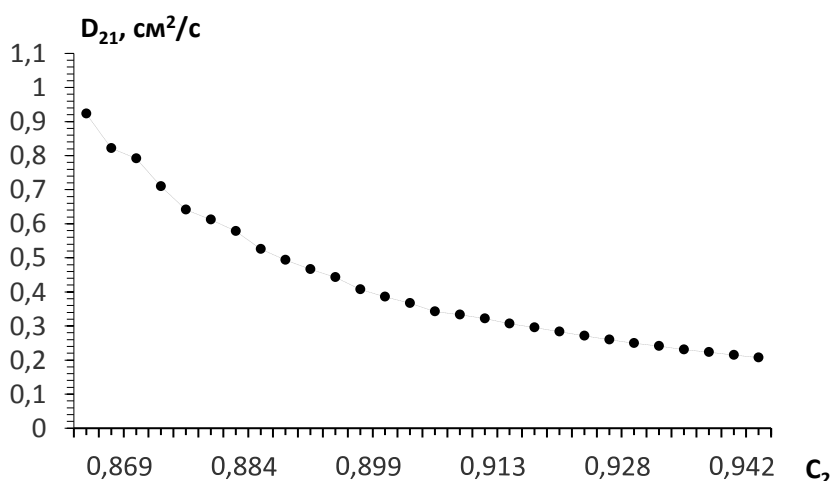


Рис. 1. Зависимость коэффициента взаимной диффузии от концентрации для локальных величин  
Fig. 1. The dependence of the coefficient of mutual diffusion on the concentration, for local variables

В методе капилляра рассматривается одномерная математическая задача, поэтому необходимо заменить радиус – вектор на одномерную пространственную координату  $x$ .

Так как формула (27) позволяет рассчитывать коэффициент взаимной диффузии для локальных величин, а нам необходима формула, выражающая зависимость коэффициента взаимной диффузии от средней концентрации (в эксперименте измеряется

средняя по длине капилляра концентрация), необходимо формулу (24) проинтегрировать по длине капилляра

$$\bar{C}_i(x, t) = \frac{1}{L} * \int_0^L C_i(x, t) dx . \tag{28}$$

Подставим (24) в (28)

$$\begin{aligned} \bar{C}_i(x, t) &= \frac{1}{L} * \int_0^L \frac{x^2 * C_{i0}}{\left(x^2 - 2 * D_{ij}(C_i) * t\right)} dx = \frac{\bar{C}_{i0}}{L} * \int_0^L \left[ 1 + \frac{2 * D_{ij}(C_i) * t}{\left(x^2 - 2 * D_{ij}(C_i) * t\right)} \right] dx = \\ &= \bar{C}_{i0} + \frac{\bar{C}_{i0}}{L} * \int_0^L \frac{2 * D_{ij}(C_i) * t}{\left(x^2 - 2 * D_{ij}(C_i) * t\right)} dx = \bar{C}_{i0} + \frac{\bar{C}_{i0} * 2 * D_{ij}(C_i) * t}{L} * \frac{1}{2 * \sqrt{2 * D_{ij}(C_i) * t}} * \\ &* \operatorname{Ln} \left\{ \frac{L - \sqrt{2 * D_{ij}(C_i) * t}}{L + \sqrt{2 * D_{ij}(C_i) * t}} \right\} = \bar{C}_{i0} + \frac{\bar{C}_{i0} * \sqrt{2 * D_{ij}(C_i) * t}}{2 * L} * \operatorname{Ln} \left\{ \frac{L - \sqrt{2 * D_{ij}(C_i) * t}}{L + \sqrt{2 * D_{ij}(C_i) * t}} \right\} = \\ &= \bar{C}_{i0} * \left[ 1 + \frac{\sqrt{2 * D_{ij}(C_i) * t}}{2 * L} * \operatorname{Ln} \left\{ \frac{L - \sqrt{2 * D_{ij}(C_i) * t}}{L + \sqrt{2 * D_{ij}(C_i) * t}} \right\} \right] \end{aligned} \tag{29}$$

Для удобства упростим формулу (29), используя формулу (25) для L

$$\bar{C}_i(x, t) = \bar{C}_{i0} * \left[ 1 + \frac{\sqrt{2 * F_0}}{2} * \operatorname{Ln} \left\{ \frac{1 - \sqrt{2 * F_0}}{1 + \sqrt{2 * F_0}} \right\} \right] . \tag{30}$$

### Экспериментальные данные и особенности их обработки

Изучение начальной стадии диффузии было проведено на установке метода открытого с одного конца капилляра [4]. В качестве объекта исследования использовалась смесь газов He-Ar. В этом методе процесс диффузии по времени растянут в 324 раза (по сравнению с исходным аналогом установки), а длительность начальной стадии диффузии лежит в интервале 2000–2500 с [10], что позволяет детально изучать начальную стадию диффузии. К сожалению, формула метода открытого с одного конца капилляра не позволяет рассчитывать коэффициенты взаимной диффузии в начальные времена [3], но ограничений в измерении средней по длине капилляра концентрации в различное время установка не имеет. В эксперименте изучалась взаимная диффузия бинарной смеси, были приведены измерения средней по длине капилляра концентрации через определённые промежутки времени. Результаты этих измерений и рассчитанные по ним коэффициенты взаимной диффузии (КВД) представлены в таблице 1.

### Результаты исследований и их обсуждение

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента взаимной диффузии от концентрации, экспериментальные точки которой аппроксимированы полиномом шестой степени

$$D_{21}(\bar{C}_2) = - \left[ \begin{array}{l} 8 * 10^8 * \bar{C}_2^6 - 4 * 10^9 * \bar{C}_2^5 + 1 * 10^{10} * \bar{C}_2^4 - 1 * 10^{10} * \bar{C}_2^3 + 8 * 10^9 * \bar{C}_2^2 - \\ - 3 * 10^9 * \bar{C}_2 + 5 * 10^8 \end{array} \right] . \tag{31}$$

Полученная кривая имеет максимум в точке А с координатами по оси абсцисс 0,8687 и оси ординат 2,9, где коэффициент диффузии имеет аномально большое значение [12]. Наблюдается аномальный рост коэффициента диффузии в первые 100 с, затем происходит полиномиальное уменьшение коэффициента диффузии вплоть до точки В – выхода процесса диффузии на регулярный режим, где начинает работать формула метода открытого с одного конца капилляра [4].

Таблица 1

Измерение средней концентрации через определённые промежутки времени  
The measurement of the average concentration after a certain period of time

<b>t, c (s)</b>	0	52,9	99,6	145,1	200,5	259,7	326,1	400,7
<b>&lt;C(t)&gt;</b>	0,1395	0,1370	0,1313	0,1287	0,1249	0,1225	0,1200	0,1165
<b>1-&lt;C(t)&gt;</b>	0,8605	0,863	0,8687	0,8713	0,8751	0,8775	0,8800	0,8835
<b>D<sub>21</sub>(&lt;C&gt;), см<sup>2</sup>/с (sm<sup>2</sup>/s)</b>	0	1,7	2,9	2,59	2,52	2,25	2,04	1,94
<b>t, c (s)</b>	484,5	576,1	679,4	787,1	897,2	1023,9	1153,9	1314,8
<b>&lt;C(t)&gt;</b>	0,1130	0,1108	0,1075	0,1044	0,1013	0,0993	0,0963	0,0926
<b>1-&lt;C(t)&gt;</b>	0,8870	0,8892	0,8925	0,8956	0,8987	0,9007	0,9037	0,9074
<b>D<sub>21</sub>(&lt;C&gt;), см<sup>2</sup>/с (sm<sup>2</sup>/s)</b>	1,84	1,665	1,56	1,465	1,387	1,275	1,206	1,139
<b>t, c (s)</b>	1459,4	1601,1	1760,6	1923,3	2093,3	2287,4	2485,8	2694
<b>&lt;C(t)&gt;</b>	0,0907	0,0872	0,0837	0,0813	0,0781	0,0750	0,0721	0,0693
<b>1-&lt;x(t)&gt;</b>	0,9093	0,9128	0,9163	0,9187	0,9219	0,9250	0,9279	0,9307
<b>D<sub>21</sub>(&lt;C&gt;), см<sup>2</sup>/с (sm<sup>2</sup>/s)</b>	1,063	1,028	0,989	0,938	0,902	0,86	0,821	0,783
<b>t, c (s)</b>	2910,6							
<b>&lt;C(t)&gt;</b>	0,0665							
<b>1-&lt;C(t)&gt;</b>	0,9335							
<b>D<sub>21</sub>(&lt;C&gt;), см<sup>2</sup>/с (sm<sup>2</sup>/s)</b>	0,748							

На основании полученных результатов можно построить график функции  $D_{ij} = f(\bar{C}_i)$  и аппроксимировать его полиномом [11].

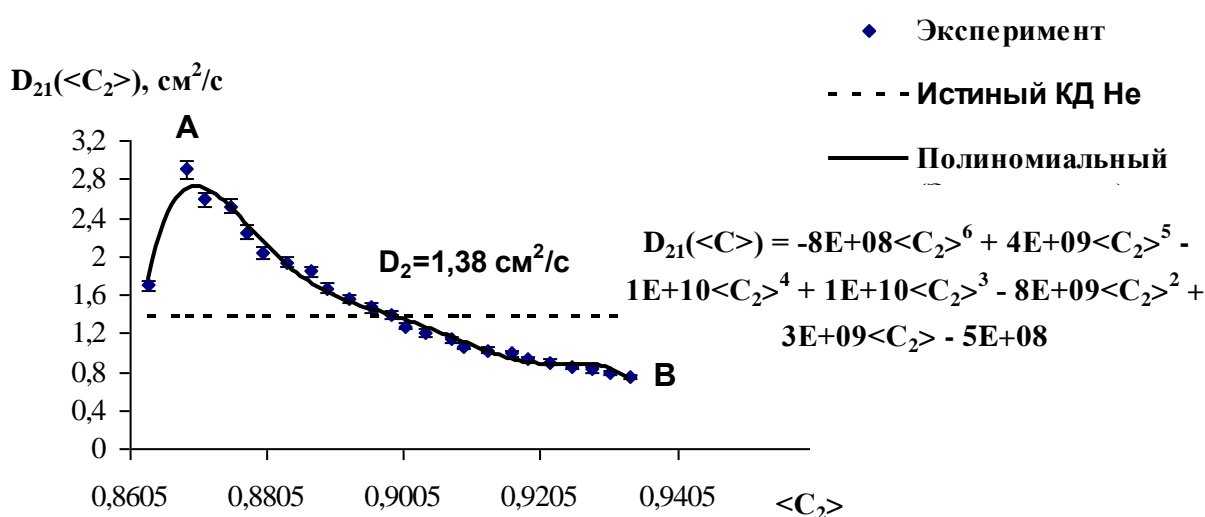


Рис. 2. Полиномиальная зависимость коэффициента взаимной диффузии от средней по длине капилляра концентрации  
Fig. 2. Polynomial dependence of the coefficient of mutual diffusion from the middle along the length of the capillary concentration

Возникшую аномалию в расчётах коэффициентов диффузии при измерении средней концентрации компонента смеси газов можно переложить на локальные величины, локальное значение концентрации компонента смеси газов и локальное значение коэффициента диффузии и найти точку, где формируется возникшая аномалия. Для этого используем формулу (27)

$$x^* = \sqrt{2 \cdot t \cdot D_{ij}(C_i) \cdot \frac{C_i(\bar{r}, t)}{C_i(\bar{r}, t) - C_{i0}}} = \sqrt{22 \cdot 99,6 \cdot 2,9 \cdot \frac{0,8687}{0,8687 - 0,8605}} = 2,474 \text{ (м)}. \quad (32)$$

Получена мнимая длина оси капилляра  $x^* = 2,474 \text{ (м)}$  [13], где действительная длина оси капилляра  $x = 1,0 \text{ (м)}$ . Мнимая (диффузионная) длина  $x^*$  превосходит действительную длину капилляра  $x$  в 2,474 раза, то есть по расчётам получается, что диффузия с аномально большими коэффициентами диффузии протекает за пределами диффузионной ячейки – капилляра. Анализ диффузионной длины статистическим методом показал [10], что фронт концентрации диффундирующего компонента газа за 950 с только достигает закрытого конца капилляра  $x = L = 1,0 \text{ (м)}$ , в отличие от предложенного метода изучения диффузии с аномально высокими КВД, где уже в первые 100 с диффузионная длина превышает размеры капилляра в 2,474 раза. Хотелось бы отметить, что коэффициенты взаимной диффузии, рассчитанные по формуле метода открытого с одного конца капилляра [3], в начальные времена, пусть даже с большой погрешностью до 20%, так же имеют большие значения, как описанные в таблице 1.

Рассмотрим динамику изменения коэффициента взаимной диффузии в мнимой точке  $x^* = 2,474 \text{ (м)}$ , которая представлена на рисунке 3.

Анализ рисунка 3 показал, что он полностью совпадает с рисунком 2 и сильно отличается от рисунка 1, где локальные величины представлены для точки  $x = L = 1,0 \text{ (м)}$ .

### Выводы

Основной задачей работы является описание начальной стадии диффузии, которая протекает на установке метода открытого с одного конца капилляра, математически метод не позволяет изучать начальную стадию диффузии из-за ограничений самого метода [4]. В процессе экспериментов была выявлена зависимость коэффициента взаимной диффузии от концентрации [5]. Предложенная выше математическая модель позволяет изучать начальную стадию диффузии и рассчитывать коэффициенты взаимной диффузии по одиночным измерениям концентрации, в отличие от формулы метода открытого с одного конца капилляра. Зависимость коэффициента взаимной диффузии описана полиномом шестой степени и представлена на рисунке 2.

Из анализа рисунка 2 можно сделать вывод, что в начальные времена наблюдается аномалия, гребень которой расположен выше мнимой прямой, проведённой параллельно оси абсцисс в точке  $D_{21}(\bar{C}_2) = D_2 = 1,38 \text{ (см}^2/\text{с)}$  [14] значения истинного коэффициента диффузии  $He$ . Наивысшая точка этого гребня  $D_{21}(\bar{C}_2) = 2,9 \text{ (см}^2/\text{с)}$  выпадает из аппроксимации полиномом, хотя и лежит в области экспериментальной погрешности и погрешности аппроксимации полиномом.

Полученная полиномиальная зависимость коэффициента взаимной диффузии позволит предсказать поведение диффузионной системы в начальные времена. Технически это необходимо для предотвращения ошибок, которые будут возникать при анализе газов, или смеси газов в газоанализаторах, которые получили широкое применение во многих сферах промышленности.



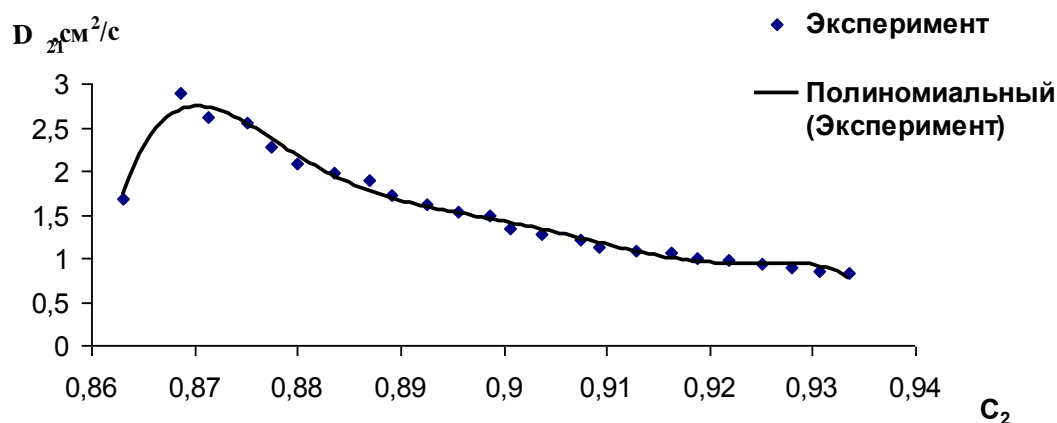


Рис. 3 Полиномиальная зависимость коэффициента взаимной диффузии от локальной концентрации в мнимой точке  $x^* = 2,474$  (м)

Fig. 3 Polynomial dependence of the coefficient of mutual diffusion of the local concentration at an imaginary point  $x^* = 2,474$  (m)

Аномалию, которая возникает в мнимой точке диффузионной длины, можно описать, если при математических расчётах диффузионной модели использовать комплексную область [13]. Рано делать какие либо предположения относительно аномалии. Но аномалия появляется при измерении средней концентрации, то есть вдоль длины луча света ( $L=1$  м). При переходе к локальным величинам аномалия должна проявиться в точке, лежащей в пределах длины диффузионной ячейки за одно и тоже время, а не в мнимой точке диффузионной длины, превышающей длину диффузионной ячейки в 2,474 раза. Это явление требует отдельного и дополнительного изучения с использованием радиометрических методов обнаружения производных аномалии [15], [16].

#### Список литературы References

1. 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.
2. [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.  
[Kosov N.D.], Voloshin U.E., Poyarkov I.V. 1990. Cryocrystals and diffusion. Workshop materials - meetings. Alma-Ata: 15–20.
3. [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.
4. [Косов Н.Д.], Кузнецов А.Т. 2018. Установка для измерения коэффициентов взаимной диффузии газов методом открытого с одного конца капилляра. Физическое образование в вузах, № 2: 112–124.  
[Kosov N.D.], Kuznetsov A. T. 2018. Setting for measuring of coefficients of mutual diffusion gases by the method of open from one end capillary. Physics in higher education, № 2: 112–124.
5. Попов П.В. 2018. Диффузия: учебно-методическое пособие по курсу Общая физика. П.В. Попов – М.: МФТИ, 2016, 94 с.  
Popov P.V. 2016. Diffusion: study-methodical allowance on-course General physics / P.V. Popov - M.: MPhTI, 94 p.

6. Кузнецов А.Т. 2017. Казусы в науке, или что мешает науке развиваться. - Алматы.: Казак Университеті, С. 50–104. ISBN 978-601-06-1846-6.

Kuznetsov A.T. 2017. Cases in science, or what prevents science from developing. Almaty.: Kazak University, P. 50–104. ISBN 978-601-06-1846-6.

7. 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.

8. Бибиков Ю.Н. 1991. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений: Учеб. Пособие для ун-тов. М.: Высш. шк., 1991. – 303 с.: ил.

Bibikov U.N. 1991. Course of usual differential equalizations : Studies allowance for University. M.: Higher Sc.,. 303 p.: with picture.

9. 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.

10. Кузнецов А.Т. 2018. Способ описания ошибок, возникающих при измерении коэффициентов взаимной диффузии газов, в начальные времена, методом открытого с одного конца капилляра. Научные ведомости БелГУ. Серия: математика физика, № 3: 299–307.

Kuznetsov A. T. 2018. Method of description of errors arising up at measuring of coefficients of mutual diffusion of gases, in initial times, by the method of open from one end capillary. Belgorod State University Scientific bulletin. Series: mathematics physics, № 3: 299–307.

11. Герасимович А.С. 2013. Аппроксимация зависимостей полиномами Изд. И.Д. Вель Сергиев Посад, 101 с. ISBN 978591582431.

Gerasimovich A.S. 2013. Approximation of dependences the polynomials Publ. I.D. All Sergiev Posad, 101 p. ISBN 978591582431.

12. Тимашев С.Ф. 2009. Аномальная диффузия в динамике сложных процессов. Химическая физика, том 28, №3: 68–80.

Timashev S.F. 2009. Anomalous diffusion in the dynamics of difficult processes. Chemical physics, tome 28, № 3: 68–80.

13. Свешников А.Г., Тиханов А.Н. 1974. Теория функции комплексной переменной 3-е издание, 319 с.

Sveshnikov A.G., Tihanov A.N. 1974. Theory function of complex variable 3th edition. - M.: Science, 319 p.

14. Варгафтик Н.Б. 1972. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е издание. М.: Наука, 721 с.

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

15. Крешков А.П. 1970. Основы аналитической химии, книга 3 – Физико-химические (инструментальные) методы анализа, 3 изд., М., 456 с.

Kreshkov A. P. 1970. Bases of analytical chemistry, book 3 are the Physical (instrumental) and chemical methods of analysis, 3 publ. M., 456 p.

16. Несмеянов А. Н. 1978. Радиохимия, 2-е изд., перераб. М.: Химия, 560 с.

Nesmeianov A.N. 1978. Radio-chemistry, 2th publ. - M.: Chemistry, 560 p.