

Научная статья

УДК 544.03

DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-14-24

## Прогнозирование значений коэффициентов молекулярной диффузии кислорода в водные растворы питательных веществ биотехнологических производств

А.Г. Новоселов<sup>1\*</sup>, А.В. Чеботарь<sup>1</sup>, И.В. Баранов<sup>1</sup>, А.Б. Дужий<sup>2</sup>, С.А. Сорокин<sup>3</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, \*agnovoselov@itmo.ru<sup>2</sup>ВНИИ Галургии, Россия, Санкт-Петербург<sup>3</sup>ООО «РусИнтелКом» Россия, Москва

**Аннотация.** Изучали вопросы молекулярного переноса массы в системе кислород–водные растворы свекловичной мелассы с целью возможности прогнозирования коэффициентов молекулярной диффузии (КМД) этой системы при проведении массообменных расчетов процесса культивирования микроорганизмов на биотехнологических производствах. Предложен алгоритм расчета КМД на основе полуэмпирического подхода по методу Уилка. Дано обоснование в пользу его применения. Определены численные значения КМД изучаемой системы для температур 293; 298; 303; 313; 323К и концентраций сухих веществ в диапазоне от 0 до 77,7 масс%. Полученные результаты позволили спрогнозировать вид кривой линии тренда, которая в исследуемых диапазонах представляет собой экспоненциальную зависимость. Это даст возможность специалистам, связанным с массообменными процессами в области культивирования микроорганизмов, применить научно-обоснованный подход при проектировании современных конструкций массообменных аппаратов и выборе оптимальных режимов их работы.

**Ключевые слова:** диффузия; коэффициент молекулярной диффузии; сахароза; водный раствор мелассы; концентрация сухих веществ

Original article

## Prediction of values of molecular diffusion coefficients for oxygen into aqueous solutions of nutrients for biotechnological productions

Alexander G. Novoselov<sup>1\*</sup>, Anastasiia V. Chebotar<sup>1</sup>, Igor V. Baranov<sup>1</sup>, Alexey B. Duzhij<sup>2</sup>, Sergey A. Sorokin<sup>3</sup><sup>1</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russia, \*agnovoselov@itmo.ru<sup>2</sup>All-Russian Research Institute Galurgii, St. Petersburg, Russia<sup>3</sup>LLC "RusIntelCom", Moscow, Russia

**Abstract.** The article is devoted to the study of molecular mass transfer in the system oxygen–aqueous solutions of beet molasses in order to obtain the possibility of predicting the molecular diffusion coefficients (MDC) of this system when carrying out mass transfer calculations of the process of cultivation of microorganisms in biotechnological production. An algorithm for calculating the CMD based on a semi-empirical approach using the Wilk method is proposed. Justification in favor of its application is given. As a result of the study the numerical values of CMD of the studied system were determined for temperatures 293K; 298K; 303K; 313K; 323K and dry matter concentrations in the range from 0 wt% to 77.7 wt%. The obtained results allowed predicting the type of the trend line curve, which in the investigated ranges represents an exponential dependence. This will allow specialists related to mass-exchange processes in the field of microorganisms cultivation to apply a science-based approach to the design of modern designs of mass-exchange apparatuses and the selection of optimal modes of their operation.

**Keywords:** diffusion; molecular diffusion coefficient; sucrose; molasses aqueous solution; dry matter concentration

### Введение

Данная статья продолжает серию научных исследований, посвященных комплексному изучению процессов переноса импульса, тепловой энергии и массы, протекающих в питательных средах биотехнологических производств. В работе [1] была обоснована необходимость выполнения таких исследований, и представлены эмпирические данные количественной оценки одной из важнейших динамических характеристик – плотности.

Аэробное культивирование микроорганизмов (бактерий, дрожжей) с целью получения большого количества биомассы вновь обретает широкий интерес как со стороны бизнеса, так и со стороны научного сообщества. Объясняется это, с одной стороны, пессимистичными прогнозами относительно производства

пищевой продукции, содержащей белок в требуемом количестве, и появлением технико-технологической возможности создавать новые предприятия для производства микробного белка, отвечающие современным требованиям [2–6]. С другой стороны, микробиологами накоплен большой научно-исследовательский опыт в получении методами генной инженерии модифицированных родов и штаммов микроорганизмов, позволяющих в процессе их жизнедеятельности получать новые целевые конечные продукты [3, 7–10]. В свою очередь промышленное производство пищевого белка требует более глубокого понимания процессов переноса импульса, теплоты и массы вещества, происходящих во время культивирования клеток микроорганизмов [11].

Аэробное культивирование микроорганизмов, в частности сахаромецетов, невозможно без присутствия растворенного в питательной среде кислорода. Как правило, питательные среды микробиологических производств имеют сложный химический состав [12]. Основная цель, преследуемая при составлении питательной среды, заключается в бесперебойном и сбалансированном обеспечении клеток функциональными элементами, необходимыми для их успешной жизнедеятельности и максимального роста. Основой питательной среды, предназначенной для культивирования дрожжей рода *Saccharomyces cerevisiae*, является вода, обогащенная свекловичной или тростниковой мелассой, с добавлением питательных солей и различных стимуляторов роста [12]. Таким образом, питательная среда представляет собой многокомпонентный водный раствор, обладающий определенными физическими и теплофизическими свойствами, зависящими в первую очередь от количественного и качественного состава присутствующих в нем веществ. Именно через эту жидкостную фазу и осуществляется процесс дыхания клеток растворенным кислородом воздуха и удаления из них в обратном направлении газообразных продуктов метаболизма в основном диоксида углерода [12, 13]. Процесс аэробного культивирования дрожжевых клеток невозможен без наличия эффекта растворения перечисленных газов в водном растворе питательных веществ.

Скорость процесса растворения кислорода во многом определяет рост микроорганизмов и является одной из важнейших характеристик ферментатора любой конструкции [13, 14]. Для ее расчета существуют различные подходы от сугубо теоретических исследований, основанных на создании математических моделей процесса культивирования, до чисто экспериментальных, реально воспроизводящих данный процесс. Первый подход очень привлекателен с точки зрения минимальных материальных вложений и может быть успешно реализован при условии, что все рабочие физико-химические процессы математически описаны, а все исходные параметры определены. Второй подход, включающий в себя создание экспериментального стенда и оснащение его контрольно-измерительной аппаратурой, более трудоемкий и затратный. В связи с этим наиболее правильным решением будет симбиоз этих двух подходов к прогнозированию тех или иных неизвестных коэффициентов переноса.

Во все математические модели, разработанные с целью расчета скорости переноса кислорода и диоксида углерода в жидкостной питательной среде, входит, как правило, коэффициент молекулярной диффузии  $D_{AB}$  [14–16].

Оценка численного значения этой фактически константы для данных газов и жидкости при данных рабочих условиях представляет довольно сложную аналитическую задачу. Проблема заключается в том, что большая часть коэффициентов молекулярного переноса для этих газов в сложной по своему химическому составу жидкостной среде численно недостаточно точно определена. Кроме того, данные по  $D_{AB}$  ограничены либо рабочими условиями проведения экспериментов, либо при теоретическом рассмотрении процесса диффузии допущениями, сильно упрощающими реальную физическую картину процессов [17, 18].

Тем не менее, существует целый ряд полуэмпирических подходов к решению данной задачи, которые позволяют спрогнозировать  $D_{AB}$ , если известно хотя бы одно его значение для данной жидкостной фазы. К такому подходу относится метод Уилка [19].

Цель исследования – разработать алгоритм проведения прогнозирования КМД кислорода в водные растворы свекловичной мелассы с обоснованием выбранных экспериментальных значений КМД в качестве опорных.

### Определение $D_{AB}$ по методу Уилка

Основываясь на положениях гидродинамической модели жидкого состояния вещества Сатерленда и Стокса, Эйнштейн представил следующую зависимость

$$D_{AB} = \frac{kT}{6\pi r_A \mu_B}, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К,

$T$  – температура, К;

$r_A$  – радиус молекулы диффундирующего вещества, м;

$\mu_B$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

C.R. Wilke [20], проанализировав уравнение (1) путем перегруппировки входящих в него переменных и постоянных величин, получил зависимость между параметрами, характеризующими диффундирующие вещества, и определяемые этими веществами коэффициенты переноса

$$F = \frac{6\pi r_A}{k} = \frac{T}{D_{AB} \mu_B}, \quad (2)$$

где  $F$  – фактор диффузии, (К·с)/(см<sup>2</sup>·сПз).

Допуская, что величина  $F$  не зависит от температуры, т. е. для данной пары веществ, в нашем случае для системы газ (A)–жидкость (B), является величиной постоянной  $F = const$ , появляется возможность спрогнозировать  $D_{AB}$  данной системы для других температурных условий.

Тогда, учитывая изложенное, можно записать

$$\frac{T_1}{D_{AB_1} \mu_{B_1}} = \frac{T_2}{D_{AB_2} \mu_{B_2}}, \quad (3)$$

где – индексы 1 и 2 при коэффициентах  $D_{AB}$  и  $\mu_B$  указывают на отношение этих параметров к соответствующей температуре.

Из соотношения (3) выражаем искомый параметр

$$D_{AB_2} = \frac{T_2 \cdot \mu_{B_1} \cdot D_{AB_1}}{T_1 \cdot \mu_{B_2}}. \quad (4)$$

Таким образом, если известны значения коэффициентов динамической вязкости жидкости при температурах  $T_1$  и  $T_2$ , а также коэффициент диффузии исследуемого газа в данной жидкости  $D_{AB_1}$  (опорное значение) при температуре  $T_1$ , то оценить  $D_{AB_2}$  не представляет особой сложности.

### Выбор объекта исследований

Для проверки обоснованности данного подхода в качестве объекта исследований выбрана система кислород (O<sub>2</sub>)–водные растворы мелассы. Выбор обусловлен приведенными аргументами и входит в план работ по теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов молекулярного переноса импульса, тепловой энергии и массы в культуральных средах биотехнологических производств [1, 21].

Литературный поиск научных исследований показал, что работ, посвященных экспериментальной оценке  $D_{AB}$  кислорода в водных растворах мелассы, нет.

Наиболее близкой к углеводному составу водных растворов мелассы, по мнению авторов, являются водные растворы сахарозы. Для подтверждения этого предположения проанализировали химический состав мелассы, представленный в таблице 1, из которой видно, что по количественному составу веществ, входящих в мелассу, подавляющую величину составляет сахароза. В связи с этим с некоторым допущением предположили, что водные растворы мелассы и сахарозы будут обладать идентичными физическими свойствами, в частности плотностью и вязкостью при сопоставимых концентрациях сухих веществ (СВ), и соответственно примерно равными коэффициентами молекулярной диффузии при сопоставимых концентрациях сухих веществ и температурах.

*Таблица 1. Химический состав свекловичной мелассы [12]  
Table 1. Chemical composition of beet molasses [12]*

Показатели	Свекловичная меласса	
	минимум	максимум
сахароза, %	40	55
инвертный сахар, %	0,1	10
раффиноза, %	—	2,5
сбраживаемые сахара, %	43	57
коллоиды, %	1,5	4,6
доброкачественность, %	56	75
зола, %	4	10
калий (K <sub>2</sub> O), %	1,0	5,5
магний (MgO), %	0,001	1,0
кальций (CaO), %	0,1	2,0
общий азот, %	0,5	2,3
биотин, мг/г	30	125
сернистый ангидрид, %	0,01	0,07
летучие кислоты, %	0,5	1,8
pH мелассы	4,9	8,5

Изысканий по молекулярной диффузии кислорода в водных растворах сахарозы существует ограниченное количество [16, 22–24]. Наиболее информативной в контексте наших исследований представляется публикация J. Jordan, E. Asgerman и R.L. Berger [16], в которой приведены экспериментальные данные по диффузии кислорода в водных растворах сахарозы при температуре 25°C для концентраций сахарозы от 0 масс.% (чистая вода) до 65 масс.%, что по исходным параметрам наиболее близко к объектам исследования. Об этом свидетельствуют практически равные значения плотности растворов, используемых в работах [16] и [1], при соответствующих концентрациях СВ и температурах. Значения содержания сухих веществ в водных растворах свекловичной мелассы и сахарозы, а также параметры плотности и вязкости в данных объектах исследований из этих работ, приведены в таблице 2. Анализируя числовые значения концентраций сухих веществ в водных растворах свекловичной мелассы и сахарозы, видно, что для дальнейшей апробации рассматриваемого метода прогнозирования получен достаточно полный концентрационный набор объектов исследований в диапазоне от 0 масс% (чистая вода) до 77,7 масс%. Впоследствии использование 19 водных растворов, а это 19 экспериментальных точек на каждой графической зависимости по каждому исследованному параметру, позволило скорректировать неточности, которые были обнаружены в данных работах.

*Таблица 2. Значения физических свойств объектов исследований при температуре 25°C [1, 16, 21]  
Table 2. Values of physical properties the objects under investigation at the temperature of 25°C [1, 16, 21]*

Содержание сухих веществ, масс%	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вязкость, Па·с	Литература
0	997	0,000894	16
0	997	0,000876	1,21
10,0	1040	0,00125	16
15,1	1066	0,0015	16
16,2	1064	0,001715	1,21
30,0	1149	0,003	16
32,5	1137	0,0038	1,21
40,2	1180	0,00582	1,21
41,9	1195	0,00702	16
51,9	1238	0,01655	1,21
52,0	1248	0,0175	16
54,5	1262	0,025	16
57,5	1278	0,035	16
60,2	1281	0,045	1,21
62,5	1302	0,067	1,21
65,0	1321	0,125	16
65	1315	0,1425	1,21
69,9	1344	0,4245	1,21
73,6	1368	1,35	1,21
77,7	1391	7,4	1,21

Графическая обработка данных по плотности и динамической вязкости водных растворов сахарозы и мелассы, представленная в таблице 2, показана на рисунке 1 и 2.

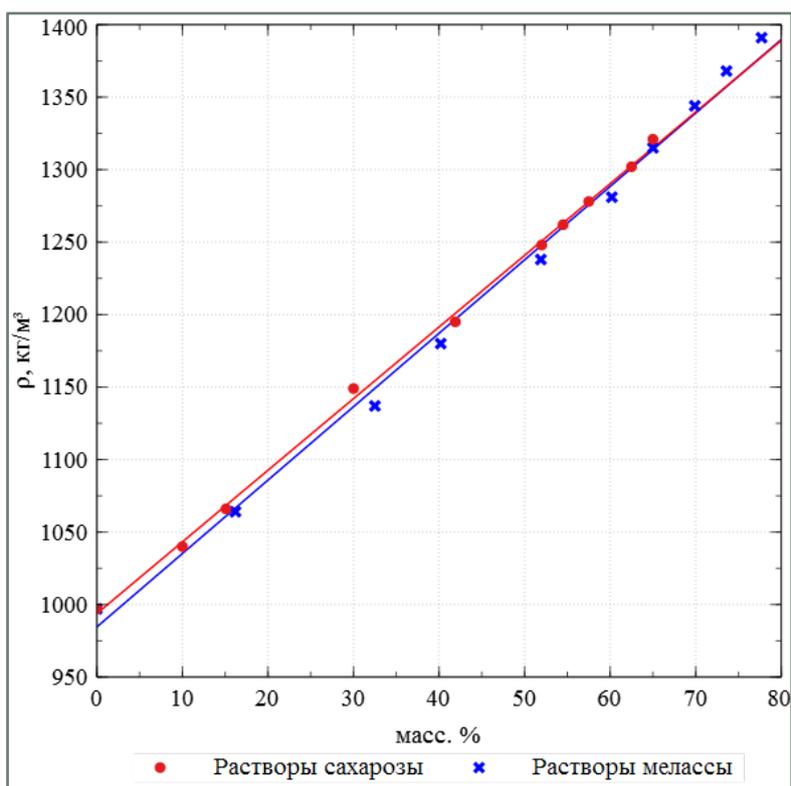


Рисунок 1 – Зависимость плотности водных растворов сахарозы [16] и мелассы [1] от концентрации сухих веществ в соответствующих объектах исследований при 25°C (по данным таблицы 2)

Figure 1. Dependency of the density of aqueous solution of sucrose [16] and molasses [1] on the concentration of dry matter in the objects under investigation at the temperature of 25°C (according to Table 2)

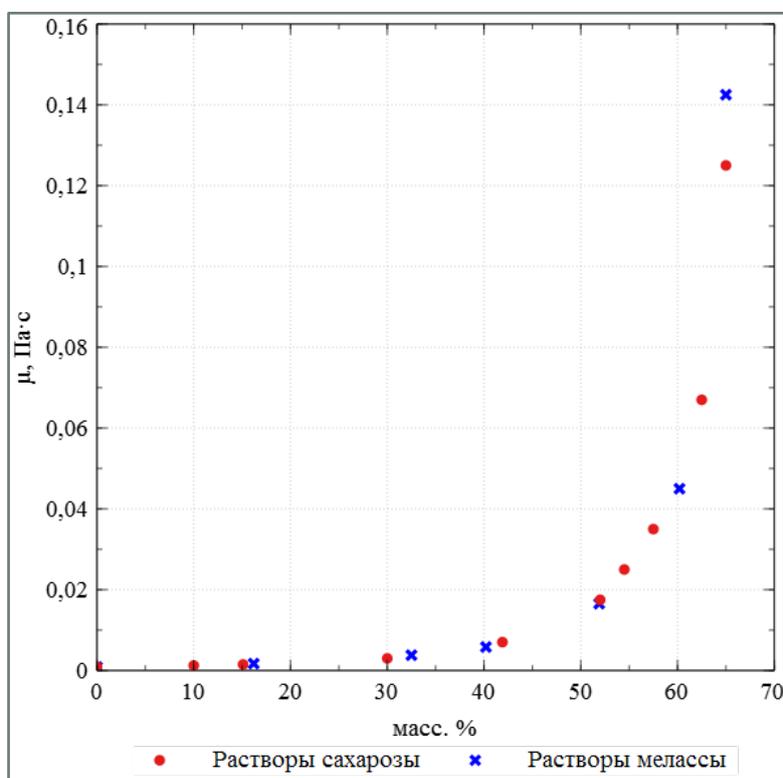


Рисунок 2 – Зависимость динамической вязкости водных растворов сахарозы [16] и мелассы [21] от концентрации СВ в соответствующих объектах исследований при 25°C (по данным таблицы 2)

Figure 2. Dependency of the dynamic viscosity of aqueous solutions of sucrose [16] and molasses [21] on the concentration of dry matter in the objects under investigation at the temperature of 25°C (according to Table 2)

Расхождение в значениях  $\rho$  и  $\mu$  при 25°C составляет не более 1,5% и можно считать, что объекты исследования, изученные в работах [1, 16, 21], достаточно близки по своему молекулярному составу, а следовательно, и процессы молекулярной диффузии кислорода в этих растворах будут протекать идентично, с примерно равными скоростями при сопоставимых концентрационных и температурных условиях.

### Выбор опорного значения $D_{AB}$

Для оценки надежности величины этого параметра проанализированы научные исследования [22], касающиеся молекулярной диффузии кислорода в чистую воду при различных температурах, и получено эмпирическое уравнение для расчета  $D_{AB}$ , имеющее экспоненциальную форму в виде

$$D_{A_{O_2}, B_{H_2O}} = 1,214 \cdot 10^{-9} \cdot \exp^{0,0241 \cdot t} \quad (5)$$

Уравнение (5), по мнению его авторов, с наибольшей точностью позволяет воспроизводить опытные данные, полученные разными учеными на различных экспериментальных установках для данной бинарной системы [22] в достаточно широком изменении температур.

Далее, базируясь на значениях коэффициента молекулярной диффузии  $O_2$  в водные растворы сахарозы, представленных в работе [16] и воспроизведенных в таблице 3, получена графическая зависимость изменения величины  $D_{AB}$  кислорода в водные растворы сахарозы при концентрациях, исследованных в работе [22] и температуре 25°C, изображенная на рисунке 3.

После аппроксимационного анализа этой графической зависимости, выполнена ее математическая обработка в виде уравнения (6), которое позволяет с определенной степенью достоверности считать полученные значения  $D_{AB}$  при температуре 25°C опорными для соответствующих концентраций растворов мелассы

$$D_{AB} = 3,62 \cdot 10^{-10} (6,82 - e^{0,0281 \cdot C}), \quad (6)$$

где  $C$  – концентрация мелассы в воде, масс. %

Таблица 3. Значения коэффициентов молекулярной диффузии  $O_2$  в водные растворы сахарозы при температуре 25°C, использованные при получении уравнения (6)

Table 3. The values of molecular diffusion coefficients  $O_2$  into aqueous solutions of sucrose at 25°C used in the derivation of equation (6)

Содержание сухих веществ, масс. %	Коэффициент молекулярной диффузии, м <sup>2</sup> /с	Литература
0	$2,218 \cdot 10^{-9}$	22
0	$2,12 \cdot 10^{-9}$	16
10,0*	$1,74 \cdot 10^{-9}$	16
10,0	$1,99 \cdot 10^{-9}$	уравнение (6)
15,1*	$1,40 \cdot 10^{-9}$	16
15,1	$1,92 \cdot 10^{-9}$	уравнение (6)
30,0	$1,54 \cdot 10^{-9}$	16
41,9	$1,32 \cdot 10^{-9}$	16
52,0	$0,92 \cdot 10^{-9}$	16
54,5	$0,67 \cdot 10^{-9}$	16
57,5	$0,65 \cdot 10^{-9}$	16
62,5	$0,43 \cdot 10^{-9}$	16
65,0	$0,25 \cdot 10^{-9}$	16

\*некорректные данные

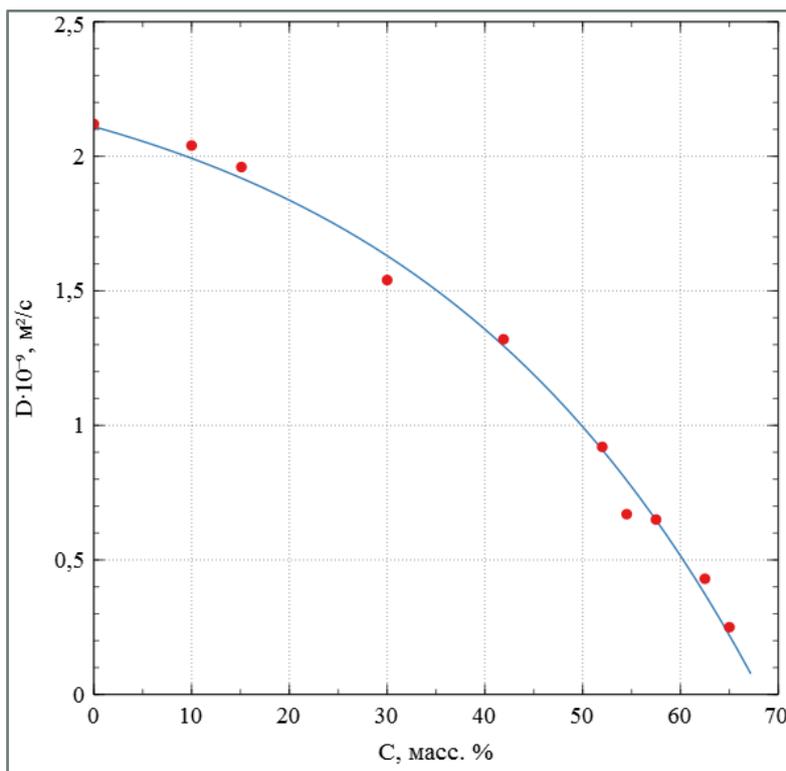


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента молекулярной диффузии  $O_2$  в водные растворы сахарозы при  $25^\circ C$  (по данным из таблицы 3)

Figure 3. Dependency of molecular diffusion coefficient  $O_2$  into sucrose aqueous solutions at  $25^\circ C$  (according to Table 3)

### Прогнозирование $D_{AB}$ кислорода в водные растворы мелассы

Основываясь на значениях  $D_{AB}$ , полученных из уравнения (6) по уравнению (2), рассчитаны значения фактора диффузии  $F$  для концентраций растворов, исследованных в работе [1], и построена графическая зависимость  $F = f(C_{св})$  при температуре  $25^\circ C$ , которая представлена на рисунке 4.

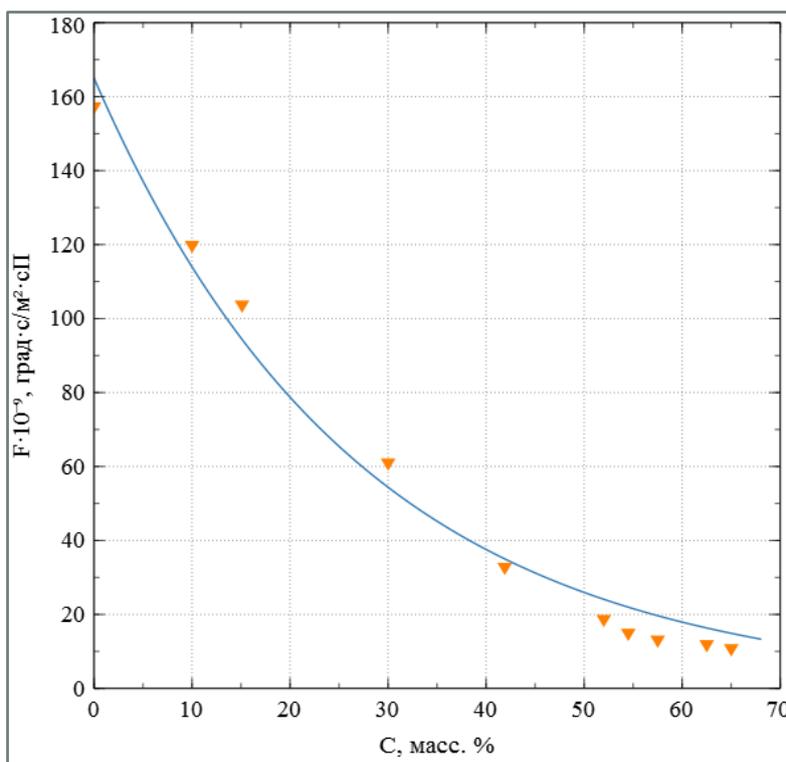


Рисунок 4 – Зависимость фактора диффузии от концентрации СВ в водных растворах мелассы при  $25^\circ C$

Figure 4. Dependency of diffusion factor on dry matter concentration in aqueous molasses solutions at  $25^\circ C$

Таким образом, для каждого исследуемого раствора параметры  $F$  и  $D_{AB1}$  становились определенными и являлись опорными при оценке  $D_{AB2}$ .

Далее, используя опорные значения по  $F$  и  $D_{AB1}$  для каждого раствора с определенной концентрацией сухих веществ мелассы (значения приведены в таблице 2 и соответствующей работе [1]), по уравнению (4) рассчитывался  $D_{AB2}$  при требуемой температуре.

Результаты проведенных расчетов представлены в графическом виде на рисунке 5.

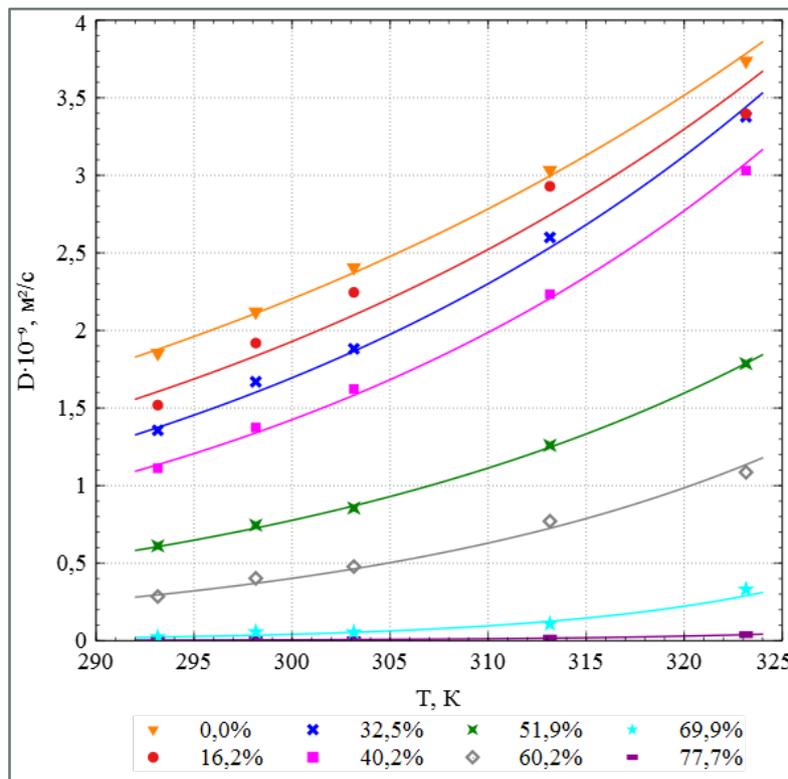


Рисунок 5 – Зависимость коэффициентов молекулярной диффузии кислорода в растворы свековичной мелассы  
 Figure 5. Dependency of molecular diffusion coefficients of oxygen into beet molasses solutions

Поскольку оптимальная температура, при которой проводится процесс культивирования клеток хлебопекарных дрожжей, лежит в пределах 28–32°C [12], то расчет значений коэффициентов молекулярной диффузии кислорода в растворы свековичной мелассы выполнен в диапазоне 20–50°C, т. е. от 293 до 323 К с шагом 10 градусов. Линии тренда, построенные по полученным данным, позволяют спрогнозировать численные значения коэффициентов молекулярной диффузии  $O_2$  в водные растворы свековичной мелассы с различной концентрацией СВ, что представляет практическую ценность при выборе оптимальных режимов работы аппаратов для культивирования микроорганизмов.

### Заключение

Предложенный способ расчета КМД по методу Уилка представляет собой полуэмпирический подход. На основе имеющихся в научно-технической литературе данных по КМД  $O_2$  в водные растворы сахарозы, полученных экспериментальным путем при температуре 25°C, данный метод позволил составить соотношение для вычисления таких коэффициентов в широком интервале температур и концентраций сухих веществ. Это представляется привлекательным с точки зрения расчета величины значений коэффициентов молекулярной диффузии, поскольку минимизирует издержки на оснащение измерительным оборудованием и с определенной степенью достоверности позволяет прогнозировать их значения. Зависимость КМД кислорода в растворы свековичной мелассы в графическом виде также подтверждает корректность и адекватность данного способа расчета. Линии тренда, построенные по полученным данным, носят экспоненциальный характер.

Значения коэффициентов переноса массы можно использовать для получения более точных математических зависимостей массообменных процессов, что в свою очередь, позволит не только научно

обосновать проектирование современных конструкций аппаратов, но и корректировать режимы их работы, выбрав эффективные.

## Литература

1. Суздальцева О.А., Фомина Е.А., Новоселов А.Г., Сорокин С.А., Баранов И.В., Кравцова Е.В., Гуляева Ю.Н. Процессы молекулярного переноса импульса, тепловой энергии и массы в жидкостных питательных средах дрожжевой и пивной отраслях промышленности. Часть 1. Исследование плотности водных растворов мелассы и концентрированного пивного сусла // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2022. № 2. С. 28–39. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-2-28-39
2. Безуглова В. Животных накормят бактериями, а бактерии — газом // Эксперт. 2021. № 14. С. 30–33.
3. Nizovtseva I., Palmin V., Simkin I., Starodumov I.O. et al. Assessing the mass transfer coefficient in jet bioreactors with classical computer vision methods and neural networks algorithms. *Algorithms*. 2023, V. 16, Is. 3, article 125. DOI: 10.3390/a16030125
4. Matassa S., Boon N., Pikaar I., Verstraete W. Microbial protein: future sustainable food supply route with low environmental footprint. *Microbial Biotechnology*. 2016, V. 9, Is. 5, pp. 568–575. DOI: 10.1111/1751-7915.12369
5. Becker E.W. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*. 2007, V. 25, no. 2, pp. 207–210. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2006.11.002
6. Caplice E., Fitzgerald G.F. Food fermentations: role of microorganisms in food production and preservation. *International Journal of Food Microbiology*. 1999, V. 50, no. 1-2, pp. 131–149. DOI: 10.1016/S0168-1605(99)00082-3
7. Положение с продовольствием в мире. Публикуемая ФАО сводка предложения зерновых и спроса на зерновые [Электронный ресурс] // Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных наций. 2023. URL: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/ru> (Дата обращения 17.01.2024)
8. Kellershohn J., Russell I. Yeast biotechnology. In Ed. Ravishankar R.V. *Advances in Food Biotechnology*. John Wiley & Sons. 2015, pp. 303–310. DOI: 10.1002/9781118864463.ch18
9. Westlake R. Large-scale continuous production of single cell protein. *Chemie Ingenieur Technik*. 1986, V. 58, Is. 12, pp. 934–937. DOI: 10.1002/cite.330581203
10. Bajić B., Vucurovic D., Vasić D., Rada J.-M., Dodić S. Biotechnological production of sustainable microbial proteins from agroindustrial residues and by-products. *Foods*. 2022, V. 12, no. 1, article 107. DOI: 10.3390/foods12010107
11. Тишин В.Б., Новоселов А.Г., Головинская О.В. Процессы переноса в технологических аппаратах пищевых и микробиологических производств. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2016. 195 с.
12. Новаковская С.С., Шишацкий Ю.И. Справочник по производству хлебопекарных дрожжей. М.: Пищевая промышленность, 1980. 375 с.
13. Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Дужий А.Б., Сивенков А.В. Разработка и проектирование ферментационного оборудования для аэробного культивирования одноклеточных микроорганизмов. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2014. 92 с.
14. Новоселов А.Г. Интенсификация массообмена между газом и жидкостью и разработка высокоэффективных аппаратов для пищевой и микробиологической промышленности: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2002. 362 с.
15. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс, 2009. 750 с.
16. Jordan J., Ackerman E., Berger R.L. Polarographic diffusion coefficients of oxygen defined by activity gradients in viscous media. *Journal of the American Chemical Society*. 1956, V. 78, no. 13, pp. 2979–2983. DOI: 10.1021/ja01594a015.
17. Новоселов А.Г., Тишин В.Б., Дужий А.Б. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. II. СПб.: Проффессионал, 2006. 916 с.
18. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Л.; Химия, 1982. 592 с.
19. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Пер. с польск. М.; Л.: Химия, 1966. 535 с.
20. Wilke C.R. Estimation of liquid diffusion coefficients. *Chem. Eng. Progr.* 1949, V. 45, no. 3, pp. 218–224.
21. Новоселов А.Г., Малахов Ю.Л., Чеботарь А.В., Сорокин С.А., Баранов И.В., Гуляева Ю.Н. Процессы молекулярного переноса в жидкостных питательных средах дрожжевой и пивной отраслях промышленности Часть 2. Исследование реологических свойств водных растворов мелассы и концентрированного пивного сусла // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2023. № 1. С. 37–48. DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-1-37-48
22. 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. С. 21–26. DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-3-21-26
23. Jamnongwong M. et al. Experimental study of oxygen diffusion coefficients in clean water containing salt, glucose or surfactant: Consequences on the liquid-side mass transfer coefficients. *Chemical Engineering Journal*. 2010, V. 165, no. 3, pp. 758–768. DOI: 10.1016/j.cej.2010.09.040

24. Hikita H., Asai S., Azuma Y. Solubility and diffusivity of oxygen in aqueous sucrose solutions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1978, V. 56, Is. 3, pp. 371–374. DOI: 10.1002/cjce.5450560316

## References

1. Suzdaltseva O. A., Fomina E. A., Novoselov A.G., Sorokin S.A., Baranov I.V., Kravtsova E.V., Gulyaeva Yu.N., Molecular transfer processes in liquid nutrient media in the yeast and beer industries. 1. Study of the density of aqueous solutions of molasses and concentrated beer wort. *Processes and Food Production Equipment*. 2022, no. 2, pp. 28–39. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-2-28-39. (In Russian)
2. Bezuglova V. Animals will be fed with bacteria, and bacteria with gas. *Expert*. 2021, no. 14, pp. 30–33. (In Russian)
3. Nizovtseva I., Palmin V., Simkin I., Starodumov I.O. at all. Assessing the mass transfer coefficient in jet bioreactors with classical computer vision methods and neural networks algorithms. *Algorithms*. 2023, V. 16, Is. 3, article 125. DOI: 10.3390/a16030125
4. Matassa S., Boon N., Pikaar I., Verstraete W. Microbial protein: future sustainable food supply route with low environmental footprint. *Microbial Biotechnology*. 2016, V. 9, Is. 5, pp. 568–575. DOI: 10.1111/1751-7915.12369
5. Becker E.W. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*. 2007, V. 25, no. 2, pp. 207–210. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2006.11.002
6. Caplice E., Fitzgerald G.F. Food fermentations: role of microorganisms in food production and preservation. *International Journal of Food Microbiology*. 1999, V. 50, no. 1-2, pp. 131–149. DOI: 10.1016/S0168-1605(99)00082-3
7. World Food Situation. FAO Cereal Supply and Demand Brief. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 2023. URL: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en> (Accessed 17.01.2024).
8. Kellershohn J., Russell I. Yeast biotechnology. In Ed. Ravishankar R.V. *Advances in Food Biotechnology*. John Wiley & Sons. 2015, pp. 303–310. DOI: 10.1002/9781118864463.ch18
9. Westlake R. Large-scale continuous production of single cell protein. *Chemie Ingenieur Technik*. 1986, V. 58, Is. 12, pp. 934–937. DOI: 10.1002/cite.330581203
10. Bajić B., Vucurovic D., Vasić D., Rada J.-M., Dodić S. Biotechnological production of sustainable microbial proteins from agroindustrial residues and by-products. *Foods*. 2022, V. 12, no. 1, article 107. DOI: 10.3390/foods12010107
11. Tishin V.B., Novoselov A.G., Golovinskaya O.V. *Transfer processes in technological apparatuses of food and microbiological productions*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2016. 195 p. (In Russian)
12. Novakovskaya S.S., Shishatsky Y.I. *Reference book on the production of baker's yeast*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost', 1980. 375 p. (In Russian)
13. Novoselov A.G., Gulyaeva Y.N., Duzhiy A.B., Sivenkov A.V. *Development and design of fermentation equipment for aerobic cultivation of single-celled microorganisms*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2014. 92 p. (In Russian)
14. Novoselov A.G. Intensification of the mass exchange between gas and liquid and development of the high-efficiency apparatuses for food and microbiological industry. *Doctor's thesis*. 2002. (In Russian)
15. Kasatkin A.G. *Basic processes and equipment of chemical technology*. Moscow, Al'yanS Publ., 2009, 750 p. (In Russian)
16. Jordan J., Ackerman E., Berger R.L. Polarographic diffusion coefficients of oxygen defined by activity gradients in viscous media. *Journal of the American Chemical Society*. 1956, V. 78, no. 13, pp. 2979–2983. DOI: 10.1021/ja01594a015.
17. Novoselov A.G., Tishin V.B., Duzhiy A.B. *New Reference Book of Chemist and Technologist. Processes and equipment of chemical technologies. Part II*. St. Petersburg, Professional Publ., 2006. 916 p. (In Russian)
18. Reed R., Prausnitz J., Sherwood T. *Properties of gases and liquids*. Leningrad, Khimiya Publ., 1982. 592 p. (In Russian)
19. Bretsznajder S. *Własności gazów i cieczy*. Wydawnictwa naukowo-techniczne, Warszawa, 1966.
20. Wilke C.R. Estimation of liquid diffusion coefficients. *Chem. Eng. Progr.* 1949, V. 45, no. 3, pp. 218–224.
21. Novoselov A.G., Malakhov Y.L., Chebotar A.V., Sorokin S.A., Baranov I.V., Gulyaeva Y.N. Molecular transfer processes in liquid nutrient media in the yeast and beer industries. 2. Study of the rheological properties for aqueous solutions of molasses and concentrated beer wort. *Processes and Food Production Equipment*. 2023, no. 1, pp. 37–48. DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-1-37-48. (In Russian)
22. 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. *Processes and Food Production Equipment*. 2020, no. 3, pp. 21–26. DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-3-21-26. (In Russian)
23. Jamnongwong M. et al. Experimental study of oxygen diffusion coefficients in clean water containing salt, glucose or surfactant: Consequences on the liquid-side mass transfer coefficients. *Chemical Engineering Journal*. 2010, V. 165, no. 3, pp. 758–768. DOI: 10.1016/j.cej.2010.09.040
24. Hikita H., Asai S., Azuma Y. Solubility and diffusivity of oxygen in aqueous sucrose solutions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1978, V. 56, Is. 3, pp. 371–374. DOI: 10.1002/cjce.5450560316

**Информация об авторах**

Александр Геннадьевич Новоселов – д-р техн. наук, профессор, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Анастасия Викторовна Чеботарь – канд. техн. наук, ведущий инженер

Игорь Владимирович Баранов – д-р техн. наук, профессор, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Алексей Борисович Дужий – канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Сергей Андреевич Сорокин – канд. техн. наук, руководитель проектов

**Information about the authors**

Alexander G. Novoselov, D. Sc. (Eng.), Professor, Associate Professor of the Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"

Anastasiia V. Chebotar, Ph.D. (Eng.), Lead Engineer

Igor V. Baranov, D. Sc. (Eng.), Professor, Associate Professor

Alexey B. Duzhij, Ph.D. (Eng.), Senior Researcher

Sergei A. Sorokin, Ph.D. (Eng.), Project Manager

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

*Статья поступила в редакцию 22.01.2024*

*Одобрена после рецензирования 18.02.2024*

*Принята к публикации 20.02.2024*

*The article was submitted 22.01.2024*

*Approved after reviewing 18.02.2024*

*Accepted for publication 20.02.2024*