Научная статья/Research Article
УДК 664.3.033:66.061:66-98
DOI: 10.36718/1819-4036-2023-1-185-194

Сергей Анатольевич Соколов[1], **Николай Николаевич Севаторов**[2],
Александр Анатольевич Яшонков[3]✉
[1,2,3]Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Республика Крым, Россия
[1]sokoloff1906@mail.ru
[2]sevatorov@gmail.com
[3]jashonkov@rambler.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСТРАКЦИИ МАСЛА ИЗ СЕМЯН ПРИМУЛЫ ВЕЧЕРНЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель исследования – изучение зависимости эффективного коэффициента диффузии D_e от внешнего гидростатического давления P при экстрагировании масла из молотых семян (шрота) примулы вечерней методом ЭВГД при постоянной (комнатной) температуре. Задачи: получить экспериментальные зависимости концентрации масла в экстракте (C_p) от времени экстрагирования t (C_p (t)) и давления P (C_p (P)); с использованием экспериментальных зависимостей C_p (t) и C_p (P) при комнатной температуре рассчитать зависимость эффективного коэффициента диффузии D_e от давления P (D_e (P)). Семена примулы вечерней (Oenothera biennis L.) получены из питомника растений «Знак Земли» в п. Лапино Московской области. С целью увеличения поверхности соприкосновения между частицами семян и растворителем семена измельчали на планетарной шаровой мельнице до получения частиц, средний диаметр проецируемой площади которых был равен dср = 0,2 ± 0,03 мм. В качестве экстрагента в соответствии с требованиями фармакопейной статьи ФС 42-3071-00 был выбран органический растворитель 70 % этанол. Экстрагирование этанолом измельчtнных семян ВГД производилось на лабораторной автоматизированной установке. Соотношение агрегаты энотеры (масса, г) к количеству растворителя (объем, мл) – 1:11 и 1:23 (или 1:10 и 1:20 в массовом соотношении). Смеси агрегаты и растворителей упаковывались в герметичные полиэтиленовые капсулы, после чего подвергали воздействию ВГД в диапазоне от 25 до 300 МПа при температуре окружающей среды 25 ± 2 °С, время экспозиции 20 мин. Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса ЭВГД при экстрагировании масла из молотых семян примулы вечерней при постоянной температуре. Получены экспериментальные зависимости концентрации масла в экстракте от времени экстрагирования и давления, на основании которых рассчитана зависимость эффективного коэффициента диффузии от давления.

***Ключевые слова**: высокое гидростатическое давление, экстрагирование, масло примулы вечерней, коэффициент диффузии*

***Для цитирования**: Соколов С.А., Севаторов Н.Н., Яшонков А.А.* Определение коэффициента диффузии в процессе экстракции масла из семян примулы вечерней с помощью высокого гидростатического давления // Вестник КрасГАУ. 2023. № 1. С. 185–194. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-1-185-194.

Sergei Anatolievich Sokolov[1], **Nikolay Nikolaevich Sevatorov**[2],
Alexander Anatolievich Yashonkov[3]✉
[1,2,3]Kerch State Marine Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia
[1]sokoloff1906@mail.ru
[2]sevatorov@gmail.com
[3]jashonkov@rambler.ru

© Соколов С.А., Севаторов Н.Н., Яшонков А.А., 2023
Вестник КрасГАУ. 2023. № 1. С. 185–194.
Bulliten KrasSAU. 2023;(1):185–194.

DETERMINATION OF THE DIFFUSION COEFFICIENT WHILE EXTRACTIING OIL FROM EVENING PRIMROSE SEEDS USING HIGH HYDROSTATIC PRESSURE

The purpose of research is to study the dependence of the effective diffusion coefficient D_e on the external hydrostatic pressure P when extracting oil from ground seeds (meal) of evening primrose using the EVHD method at a constant (room) temperature. Tasks: to obtain experimental dependences of the oil concentration in the extract (C_p) on the extraction time t (C_p (t)) and pressure P (C_p (P)); using the experimental dependences C_p (t) and C_p (P) at room temperature, calculate the dependence of the effective diffusion coefficient De on pressure P (D_e (P)). Seeds of evening primrose (Oenothera biennis L.) were obtained from the Znak Zemli plant nursery in the village of Lapino, the Moscow Region. In order to increase the contact surface between the seed particles and the solvent, the seeds were crushed in a planetary ball mill until particles were obtained, the average diameter of the projected area of which was equal to dav = 0,2 ± 0,03 mm. As an extractant, in accordance with the requirements of the pharmacopoeial article FS 42-3071-00, an organic solvent of 70 % ethanol was chosen. Extraction with ethanol of crushed seeds of VGD was carried out on a laboratory automated installation. The ratio of evening primrose aggregates (mass, g) to the amount of solvent (volume, ml) is 1:11 and 1:23 (or 1:10 and 1:20 in a mass ratio). Mixtures of aggregates and solvents were packed in sealed polyethylene capsules, after which they were subjected to the VGD effect in the range from 25 to 300 MPa at an ambient temperature of 25 ± 2 °C, exposure time was 20 min. The results of experimental and theoretical studies of the EVHD process during the extraction of oil from ground seeds of evening primrose at a constant temperature are presented. Experimental dependences of the oil concentration in the extract on the extraction time and pressure were obtained, on the basis of which the dependence of the effective diffusion coefficient on pressure was calculated.

***Keywords**: high hydrostatic pressure, extraction, evening primrose oil, diffusion coefficient*

***For citation:** Sokolov S.A., Sevatorov N.N., Yashonkov A.A.* Determination of the diffusion coefficient while extractiing oil from evening primrose seeds using high hydrostatic pressure // Bulliten KrasSAU. 2023;(1): 185–194. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2023-1-185-194.

Введение. Примула вечерняя (*Oenothera* L.) – растение, принадлежащее к семейству *Onagraceae*, в котором наиболее многочисленным видом является *Oenothera biennis*. Растения, принадлежащие к роду *Oenothera* L., характеризуются наличием в них биологически активных веществ. Общими компонентами всех частей растений *Oenothera biennis* являются жирные кислоты, фенольные кислоты и флавоноиды. Семена примулы также содержат белки, углеводы, минералы и витамины. Поэтому наибольший научный интерес в качестве источников биологически активных соединений представляют семена, и прежде всего – масло семян примулы вечерней. Это масло содержит в основном алифатические спирты, жирные кислоты, стерины и полифенолы. Масло примулы вечерней (МПВ) содержит большое количество линолевой кислоты (LA) (70–74 %) и γ-линоленовой кислоты (GLA) (8–10 %), которые обладают противовоспалительными и антипролиферативными свойствами [1]. Семена примулы вечерней содержат около 20 % масла. Количество масла зависит от различных факторов, таких как возраст семян, сорт и условия выращивания [2]. Как правило, масло примулы вечерней получают из семян методом холодного прессования.

Масло представляет собой смесь примерно 13 фракций триацилглицерина, где доминирующие комбинации состоят из следующих жирных кислот: линолевая-линолевая-линолевая (LLL, 40 %), линолевая-линолевая-γ-линоленовая (LLLnγ, ≈ 15 %), линолевая-линолевая-пальмитиновая (LLP, ≈ 8 %), и линолевая-линолевая-олеиновая (LLO, ≈ 8 %) [3]. Масло состоит из триацилглицеринов – около 98 %, с небольшим количеством других липидов и примерно 1–2 % неомыляемой фракции [2]. Масло примулы вечерней также содержит другие жирные кислоты: пальмитиновую, олеиновую, стеариновую и (в меньших количествах) миристиновую, олеопальмитиновую, ваксеновую, эйкозановую и эйкозеновую (табл. 1).

Масло примулы вечерней помимо алифатических спиртов, которые составляют около 798 мг/кг масла, содержит небольшое количество токоферолов и фенольных кислот, которые присутствуют в свободной кислотной форме и в виде производных сложных эфиров и гликозидов (табл. 2) [4].

Таблица 1

Жирнокислотный состав масла *Oenothera biennis* L. [2]

Кислота	Содержание, %
Линолевая	73,88 ± 0,09
Г-линоленовая	9,24 ± 0,05
Олеиновая	6,93 ± 0,02
Пальмитиновая	6,31 ± 0,14
Стеариновая	1,88 ± 0,02
Ваксеновая	0,81 ± 0,03
Эйкозеновая	0,55 ± 0,01
Эйкозановая	0,31 ± 0,03
Бегеновая	0,10 ± 0,01

Таблица 2

Состав фенольной кислоты, мг/кг, в семенах *Oenothera biennis* L. [4]

Кислота	Содержание			
	Свободные	Сложные эфиры	Гликозиды	Всего
4-гидроксибензойная	4,12 ± 0,25	0,38 ± 0,07	0,29 ± 0,10	4,79 ± 0,26
2-гидрокси-4-метоксибензойная	6,52 ± 0,30	н/о	0,83 ± 0,28	7,35 ± 0,41
Кофейная кислота	6,48 ± 0,29	0,80 ± 0,14	н/о	7,51 ± 0,33
м-Кумаровая кислота	4,90 ± 0,45	0,83 ± 0,21	н/о	5,73 ± 0,50
п-Кумаровая кислота	1,32 ± 0,10	1,96 ± 0,23	0,06 ± 0,06	3,34 ± 0,25
Феруловая кислота	4,08 ± 0,30	0,72 ± 0,09	0,22 ± 0,06	5,02 ± 0,32
Галловая кислота	1,87 ± 0,22	7,03 ± 0,82	5,91 ± 1,56	14,8 ± 1,78
Протокатехиновая кислота	50,28 ± 0,77	10,9 ± 0,34	2,16 ± 2,42	63,4 ± 2,56
Ванильная кислота	5,22 ± 0,28	0,06 ± 0,02	0,83 ± 0,28	7,35 ± 0,41
Вератровая кислота	н/о	0,41 ± 0,03	0,47 ± 0,15	0,88 ± 0,15
Салициловая	1,15 ± 0,04	1,40 ± 0,18	н/д	2,55 ± 0,18

Также семена содержат около 15 % белка и 43 % углеводов (в виде клетчатки, наряду с крахмалом и декстрином). Помимо лигнина семена содержат аминокислоты: триптофан (1,60 %), лизин (0,31), треонин (0,35), цистеин (1,68), валин (0,52), изолейцин (0,41), лейцин (0,87) и тирозин (1,05 %). Кроме того, семена содержат минералы, в основном кальций, калий и магний, а также витамины А, В, С и Е [5].

Цель исследования – изучение зависимости эффективного коэффициента диффузии D_e от внешнего гидростатического давления Р при экстрагировании масла из молотых семян (шрота) примулы вечерней методом ЭВГД при постоянной (комнатной) температуре.

Задачи: получить экспериментальные зависимости концентрации масла в экстракте (C_p) от времени экстрагирования t (C_p (t)) и давления Р (C_p (P)); с использованием экспериментальных зависимостей C_p (t) и C_p (P) при комнатной температуре рассчитать зависимость эффективного коэффициента диффузии D_e от давления Р ($D_e(P)$).

Материалы и методы. Для проведения исследования семена примулы вечерней (*Oenothera biennis* L.) получены из питомника растений «Знак Земли» в поселке Лапино Московской области [6]. С целью увеличения поверхности соприкосновения между частицами семян и растворителем семена измельчали на планетарной шаровой мельнице до получения частиц, средний диаметр проецируемой площади (dср) которых был равен 0,2 ± 0,03 мм [7, 8]. В качестве экстрагента в соответствии с требованиями фармакопейной статьи ФС 42-3071-00 был выбран органический растворитель 70 % этанол.

Экстрагирование этанолом измельченных семян ВГД производилось на лабораторной автоматизированной установке [9]. Соотношение агрегаты энотеры (масса, г) к количеству растворителя (объем, мл) – 1:11 и 1:23 (или 1:10 и 1:20 в массовом соотношении). Смеси агрегаты и растворителей упаковывались в герметичные полиэтиленовые капсулы, после чего подвергали воздействию ВГД в диапазоне от 25 до 300 МПа при температуре окружающей среды (25±2) °С, время экспозиции – 20 мин.

Исследование спектральных свойств экстрактов масла проводили методом абсорбционной спектрофотометрии в диапазоне длин волн от 280 до 1030 нм на экспериментальной установке с модернизированным однолучевым спектрографом PGS-2 (Carl Zeiss) и фотоприемным устройством на основе спектрофотометрического детектора СФД-1 с фотодиодом ФДУК-100УТ [10, 11].

Для исследования зависимости эффективного коэффициента диффузии D_e от внешнего гидростатического давления Р при экстрагировании масла из молотых семян (шрота) примулы вечерней методом ЭВГД при постоянной (комнатной) температуре необходимо вывести уравнение для расчета коэффициента диффузии масла.

Уравнение диффузии нестационарного состояния запишем в виде уравнения Фика [12]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где C – концентрация; D_e – коэффициент диффузии; x – путь диффузии; t – время процесса.

Для бесконечного слоя шрота, подвергаемого экстракции экстрагентом, при допущениях: равномерного исходного объемного распределения масла в слое шрота, малого внешнего сопротивления массопереносу, постоянстве объема слоя – и следующих начальных и граничных условиях

$$C = C_0 \text{ при } t = 0,\ -L < x < +L, \quad (2)$$

$$C = C_1 \text{ при } t > 0,\ x = l. \quad (3)$$

Решение уравнения (1) для концентрации (C) можно записать в виде

$$C = \frac{(C_t - C_e)}{(C_0 - C_e)} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_e t \left(\frac{1}{4L^2}\right)\right], \quad (4)$$

где D_e – эффективный коэффициент диффузии массы, м²/с; C – безразмерная концентрация; C_0, C_t и C_e – начальная концентрация масла, концентрация масла по истечении времени t и равновесная концентрация масла соответственно; t – время экстракции, с; L – полутолщина образца, м; n – целое положительное число.

Число Фурье (Fo) для диффузии масла определяется уравнением

$$Fo = \frac{D_e}{L^2} t. \quad (5)$$

Когда величина числа Фурье (Fo) больше 0,1, то в решении уравнения (4) доминирующим является только первый член [13].

При этом уравнение (4) сводится к уравнению (6):

$$C = \frac{(C_t - C_e)}{(C_0 - C_e)} = \frac{8}{\pi^2} exp\left(-\frac{\pi^2 D_e}{4L^2} t\right), \quad (6)$$

и после его преобразования получается уравнение (7):

$$ln\left(\frac{\pi^2}{8} C\right) = ln\left(\frac{\pi^2}{8}\right)\left(\frac{(C_t - C_e)}{(C_0 - C_e)}\right) = -\frac{\pi^2 D_e}{4L^2} t. \quad (7)$$

Уравнение (7) используется для расчета коэффициента диффузии масла [14].

Влияние давления обработки на D_e при постоянной температуре T представим уравнениями Аррениуса (8) и Эйринга (9) [15]:

$$D_e = A_1\, exp\left(-\frac{B_1}{T}\right), \quad (8)$$

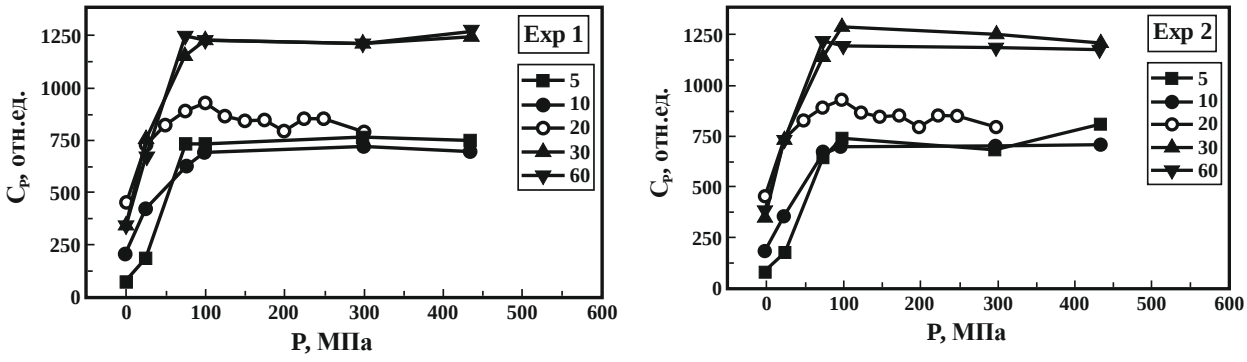
$$D_e = A_2\, exp(-B_2 \cdot P), \quad (9)$$

где A_1, A_2, B_1 и B_2 – константы; T – температура, °К; P – давление обработки, МПа.

Результаты и их обсуждение. Площадь под спектрами оптической плотности D_Σ^P пропорциональна суммарной концентрации C_P ве-

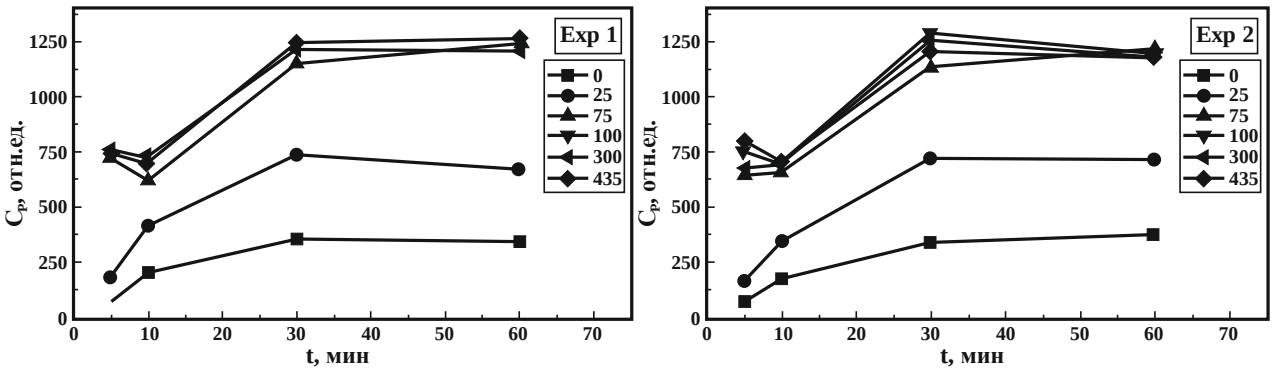
ществ в экстракте масла, извлеченного из шрота семян примулы вечерней методом ЭВГД при давлении P: $D_{\Sigma}^{P} \cong C_{P}$. Экспериментальные зависимости C_p (P) при давлениях P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa и времени экстрагирования t = 5; 10; 30; 60 мин показаны на рисунке 1.

Экспериментальные зависимости C_p (t) при давлениях P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa и времени экстрагирования t = 5; 10; 30; 60 мин показаны на рисунке 2.



а б

Рис. 1. Экспериментальные зависимости C_p (P) при давлениях P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa и времени экстрагирования t = 5; 10; 30; 60 мин в двух эквивалентных экспериментах Exp 1 (а) и Exp 2 (б)



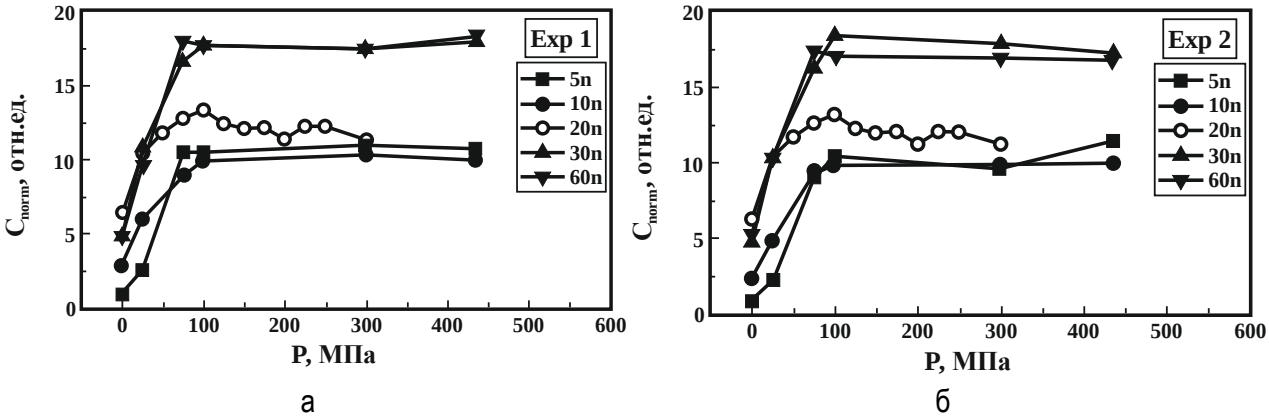
а б

Рис. 2. Экспериментальные зависимости $C_P(t)$ при давлениях P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa и времени экстрагирования t = 5; 10; 30; 60 мин в двух эквивалентных экспериментах Exp 1 (а) и Exp 2 (б)

Концентрации C_p, полученные за время экстрагирования t = 5; 10; 30; 60 мин при давлениях P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa нормировали на концентрацию при атмосферном давлении P = 0,1 MPa и времени экстрагирования t = 5 мин ($C_{норм} = \frac{C_P}{C_{P=1атм}^{t=5мин}}$).

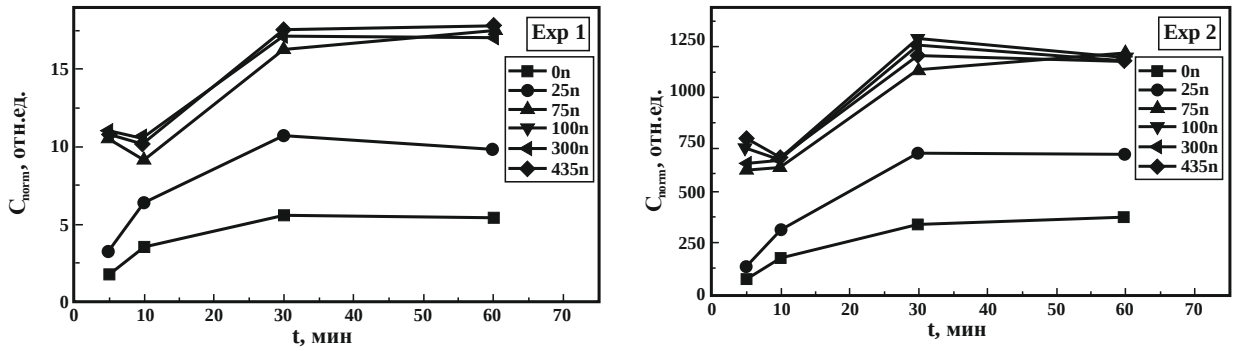
Нормированные зависимости $C_{норм}$ (P) при давлениях P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa и времени экстрагирования t = 5; 10; 30; 60 мин приведены на рисунке 3.

Нормированные зависимости $C_{норм}$ (t) при давлениях P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa и времени экстрагирования t = 5; 10; 30; 60 мин приведены на рисунке 4.



а б

Рис. 3. Нормированные зависимости $C_{норм}$ (P) при давлениях P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa и времени экстрагирования t = 5; 10; 30; 60 мин в двух эквивалентных экспериментах Exp 1 (а) и Exp 2 (б)



а б

Рис. 4. Нормированные зависимости $C_{норм}$ (*t*) при давлениях P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa и времени экстрагирования t = 5; 10; 30; 60 мин в двух эквивалентных экспериментах Exp 1 (а) и Exp 2 (б)

Преобразованное решение уравнения Фика для концентраций *C* имеет вид

$$ln\left(\frac{\pi^2}{8}C\right) = -\frac{\pi^2 D_e}{4r^2}t, \qquad (10)$$

где *C* – концентрация; D_e – коэффициент диффузии; *r* – средний радиус сферических частиц в шроте энотеры; *t* – время процесса (экстрагирования).

Из уравнения (10) коэффициент диффузии D_e будет

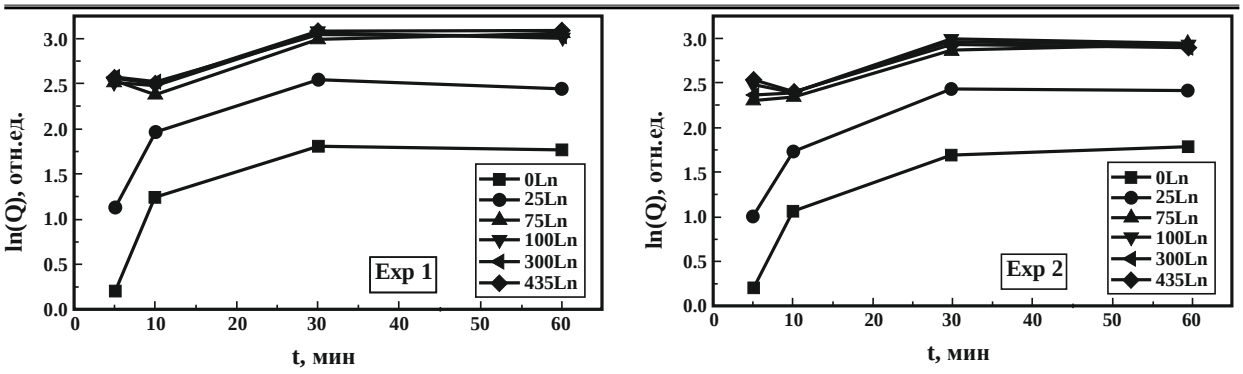
$$D_e = -\frac{4r^2}{\pi^2}\cdot\frac{ln\left(\frac{\pi^2}{8}C\right)}{t} = -Const\cdot\frac{ln\left(\frac{\pi^2}{8}C\right)}{t}, \qquad (11)$$

где $Const = \frac{4\cdot r^2}{\pi^2} = \frac{4\cdot 0.0001^2}{9.8696044} = 4{,}0528473\cdot 10^{-9}(m^2)$.

Обозначим для удобства величину

$$Q = \frac{\pi^2}{8}C_{норм}.$$

Тогда эффективные коэффициенты диффузии D_e при давлениях *P* = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa можно определить из графиков зависимостей $ln(Q)(t)$, приведенных на рисунке 5.



а б

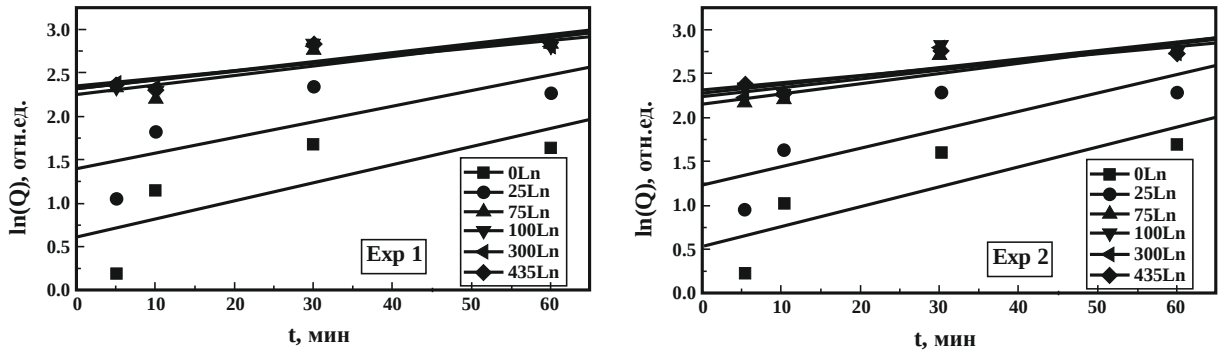
Рис. 5. Зависимости $ln(Q)(t)$ для давлений P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa и времени экстрагирования t = 5; 10; 30; 60 мин в двух эквивалентных экспериментах Exp 1 (а) и Exp 2 (б)

Для расчета эффективного коэффициента диффузии D_e при давлениях P = 0,1; 25; 75; 100; 300; 435 MPa экспериментальные зависимости $Q(t)$ на рисунке 3 аппроксимируем линейными функциями в виде

$$y(t) = a + b \cdot t, \qquad (12)$$

где a и b – числовые коэффициенты.

Результат линейной аппроксимации экспериментальных данных на рисунке 4 представлен на рисунке 6.



а б

Рис. 6. Результат линейной аппроксимации экспериментальных данных на рисунке 4 в двух эквивалентных экспериментах Exp 1 (а) и Exp 2 (б)

Числовые коэффициенты a и b, найденные методом наименьших квадратов по данным двух эквивалентных экспериментов Exp 1 и Exp 2, сведены в таблице 3.

Зависимость эффективного коэффициента диффузии D_e от давления P без учета *Const* в уравнении (11) представлена на рисунке 7.

Таблица 3

Числовые коэффициенты a, b и коэффициент детерминации

Коэффициент	P, MPa					
	0.1	25	75	100	300	435
Exp 1						
a	0,67475	1,52067	2,42708	2,49391	2,53666	2,50758
b	0,02233	0,01933	0,01194	0,0109	0,00979	0,01115
R^2	0,5596	0,5605	0,77476	0,72582	0,7319	0,75546
Exp 2						
a	0,55715	1,3246	2,31652	2,45588	2,39911	2,49169
b	0,02444	0,02248	0,01249	0,0102	0,01108	0,00885
R^2	0,68746	0,65972	0,82489	0,65142	0,69783	0,6696

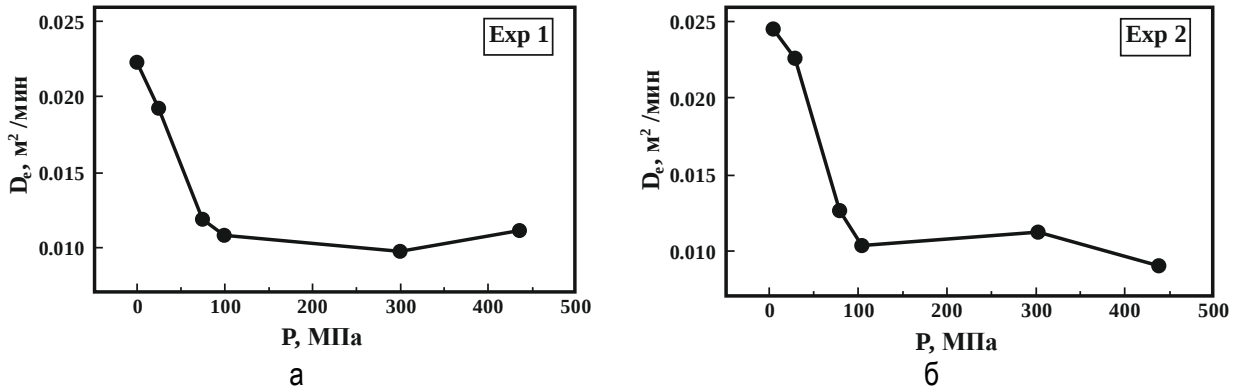


Рис. 7. Зависимость эффективного коэффициента диффузии D_e от давления P без учета Const в уравнении (11) в двух эквивалентных экспериментах Exp 1 (а) и Exp 2 (б)

Заключение

1. Проведено исследование зависимости эффективного коэффициента диффузии D_e от внешнего гидростатического давления P при экстрагировании масла из молотых семян (шрота) примулы вечерней методом ЭВГД при постоянной (комнатной) температуре.

2. Получены экспериментальные зависимости концентрации масла в экстракте (C_p) от времени экстрагирования t (C_p (t)) и давления P (C_p (P)).

3. С использованием экспериментальных зависимостей C_p (t) и C_p (P) при комнатной температуре рассчитана зависимость эффективного коэффициента диффузии D_e от давления P (D_e (P)).

Список источников

1. *Christie William*. (1999). The analysis of evening primrose oil. Industrial Crops and Products. 10. 73–83. DOI: 10.1016/S0926-6690(99)00013-8.
2. Phytochemical characterization of potential nutraceutical ingredients from Evening Primrose oil (*Oenothera biennis* L.) / *S. Montserrat-de la Paz* [et al] // Phytochem. Lett. 2014, 8, 158–162.
3. Lipids from evening primrose and borage seeds / *R. Zadernowski* [et al] // Oilseed Crops 1999, 20, 581–589.
4. *Zadernowski R., Naczk M., Nowak-Polakowska H*. Phenolic Acids of Borage (*Borago officinalis* L.) and Evening Primrose (*Oenothera biennis* L.). J. Am. Oil Chem. Soc. 2002, 79, 335–338.
5. *Hudson B.J.F*. Evening primrose (*Oenothera spp.*) oil and seed. J. Am. Oil Chem. Soc. 1984, 61, 540–543.
6. Питомник растений «Знак Земли». URL: zpitomnik.ru (дата обращения 21.08.2022 г).
7. Исследование влияния гидростатического давления на экстракцию компонентов из семян энотеры двулетней (Oenothéra biénnis L.) / *Г.В. Букин* [и др.] // Физика и техника высоких давлений. 2017. Т. 27, № 3. С. 51–62. EDN XUEUIH.
8. *Асякина Л.К., Еремеева Н.И., Дышлюк Л.С*. Подбор оптимальных параметров экстрагирования комплекса биологически активных соединений из суспензионных культур лекарственных растений Сибирского федерального округа // Вестник КрасГАУ. 2021. № 8 (173). С. 176–187. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-8-176-187. EDN RRYYJL.
9. Разработка экспериментального комплекса для исследований процесса экстрагирования высоким давлением / *С.А. Соколов* [и др.] // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2019): сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию ДГТУ (РИСХМ) (с. Дивноморское, 4–14 сентября 2019 г.). с. Дивноморское: ДГТУ-ПРИНТ, 2019. С. 145–150. DOI: 10.23947/itno.2019.145-150. EDN RTFGNX.
10. Исследование характеристик фотоприемного устройства для денситометрического

комплекса / *В. Суханов* [и др.] // Фотоника. 2014. № 1 (43). С. 75–84.
11. Влияние условий экстракции сверхвысоким давлением на выход масла из семян энотеры двулетней / *В.Ф. Дроботько* [и др.] // Физика и техника высоких давлений. 2018. Т. 28, № 4. С. 22–38. EDN VQKPCT.
12. *Crank J*. The Mathematics of Diffusion. Oxford: Clarendon Press, 1975.
13. *McCabe W.L., Smith J.C*. Unit Operations of Chemical Engineering, 3rd ed.; McGrawHill: New York, NY, 1976; 280.
14. *Doymaz I., Pala M*. The Effects of Dipping Pretreatments on Air-Drying Rates of the Seedless Grapes. J. Food Eng. 2002, 52, 413–417. DOI: 10.1016/s0260-8774(01)00133-9.
15. Mild-Heat and High-Pressure Inactivation of Carrot Pectin Methylesterase: A Kinetic Study / *B. Ly-Nguyen* [et al.] // J. Food Sci. 2003, 68, 1377–1383. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2003.tb09653.x.

References

1. *Christie William*. (1999). The analysis of evening primrose oil. Industrial Crops and Products. 10. 73-83. DOI: 10.1016/S0926-6690(99)00013-8.
2. Phytochemical characterization of potential nutraceutical ingredients from Evening Primrose oil (*Oenothera biennis* L.) / *S. Montserrat-de la Paz* [et al] // Phytochem. Lett. 2014, 8, 158-162.
3. Lipids from evening primrose and borage seeds / *R. Zadernowski* [et al] // Oilseed Crops 1999, 20, 581-589.
4. *Zadernowski R., Naczk M., Nowak-Polakowska H*. Phenolic Acids of Borage (*Borago officinalis* L.) and Evening Primrose (*Oenothera biennis* L.). J. Am. Oil Chem. Soc. 2002, 79, 335-338.
5. *Hudson B.J.F*. Evening primrose (*Oenothera spp.*) oil and seed. J. Am. Oil Chem. Soc. 1984, 61, 540-543.
6. Pitomnik rastenij «Znak Zemli». URL: zpitomnik.ru (data obrascheniya 21.08.2022 g).
7. Issledovanie vliyaniya gidrostaticheskogo davleniya na `ekstrakciyu komponentov iz semyan `enotery dvuletnej (Oenothéra biénnis L.) / *G.V. Bukin* [i dr.] // Fizika i tehnika vysokih davlenij. 2017. T. 27, № 3. S. 51–62. EDN XUEUIH.
8. *Asyakina L.K., Eremeeva N.I., Dyshlyuk L.S*. Podbor optimal'nyh parametrov `ekstragirovaniya kompleksa biologicheski aktivnyh soedinenij iz suspenzionnyh kul'tur lekarstvennyh rastenij Sibirskogo federal'nogo okruga // Vestnik KrasGAU. 2021. № 8 (173). S. 176–187. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-8-176-187. EDN RRYYJL.
9. Razrabotka `eksperimental'nogo kompleksa dlya issledovanij processa `ekstragirovaniya vysokim davleniem / *S.A. Sokolov* [i dr.] // Innovacionnye tehnologii v nauke i obrazovanii (ITNO-2019): sb. tr. VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyasch. 90-letiyu DGTU (RISHM) (s. Divnomorskoe, 4–14 sentyabrya 2019 g.). s. Divnomorskoe: DGTU-PRINT, 2019. S. 145–150. DOI: 10.23947/itno.2019.145-150. EDN RTFGNX.
10. Issledovanie harakteristik fotopriemnogo ustrojstva dlya densitometricheskogo kompleksa / *V. Suhanov* [i dr.] // Fotonika. 2014. № 1 (43). S. 75–84.
11. Vliyanie uslovij `ekstrakcii sverhvysokim davleniem na vyhod masla iz semyan `enotery dvuletnej / *V.F. Drobot'ko* [i dr.] // Fizika i tehnika vysokih davlenij. 2018. T. 28, № 4. S. 22–38. EDN VQKPCT.
12. *Crank J*. The Mathematics of Diffusion. Oxford: Clarendon Press, 1975.
13. *McCabe W.L., Smith J.C*. Unit Operations of Chemical Engineering, 3rd ed.; McGrawHill: New York, NY, 1976; 280.
14. *Doymaz I., Pala M*. The Effects of Dipping Pretreatments on Air-Drying Rates of the Seedless Grapes. J. Food Eng. 2002, 52, 413-417. DOI: 10.1016/s0260-8774(01)00133-9.
15. Mild-Heat and High-Pressure Inactivation of Carrot Pectin Methylesterase: A Kinetic Study / *B. Ly-Nguyen* [et al.] // J. Food Sci. 2003, 68, 1377-1383. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2003.tb09653.x.

Статья принята к публикации 04.10.2022 / The article accepted for publication 04.10.2022.

Информация об авторах:

Сергей Анатольевич Соколов[1], профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств, доктор технических наук, профессор
Николай Николаевич Севаторов[2], доцент кафедры машин и аппаратов пищевых производств, кандидат технических наук, доцент
Александр Анатольевич Яшонков[3], заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств, кандидат технических наук, доцент

Information about the authors:

Sergei Anatolievich Sokolov[1], Professor at the Department of Machines and Apparatuses for Food Production, Doctor of Technical Sciences, Professor
Nikolay Nikolaevich Sevatorov[2], Associate Professor at the Department of Machines and Apparatus for Food Production, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Alexander Anatolievich Yashonkov[3], Head of the Department of Machines and Apparatus for Food Production, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor