

Научная статья/Research Article

УДК 664.8:634.451

DOI: 10.36718/1819-4036-2025-1-168-182

Артем Евгеньевич Макаров¹, Игорь Юрьевич Алексанян²,
Альберт Хамед-Харисович Нугманов³, Павел Дмитриевич Осмоловский⁴,
Игорь Алексеевич Бакин⁵

^{1,2}Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

^{3,5}Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

⁴Липецкий НИИ рапса – филиал Всероссийского НИИ масличных культур им. В.С. Пустовойта, Липецк, Россия

¹artem.makarov.2011@mail.ru

²16081960igor@gmail.com

³nugmanov@rgau-msha.ru

⁴pavel.osmolovsku@mail.ru

⁵bakin@rgau-msha.ru

ВЫЯВЛЕНИЕ ДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ МЯКОТИ ХУРМЫ

Цель исследования – определение движущей силы процесса экстрагирования водорастворимых веществ из мякоти плодов хурмы на основе информации о его кинетике и гидродинамике, а также изучение статике данной операции, в частности коэффициентов распределения равновесных концентраций экстрагируемого вещества в обеих фазах. Задачи: исследование статистических закономерностей операции экстрагирования водорастворимых веществ из мякоти плодов хурмы с целью определения коэффициентов распределения равновесных концентраций экстрагируемого вещества в обеих фазах, определяющих движущую силу процесса; выявление движущей силы процесса экстрагирования водорастворимых веществ из мякоти плодов хурмы без использования ультразвука на основе информации о кинетике и гидродинамике исследуемого массопереноса; выявление движущей силы процесса экстрагирования водорастворимых веществ из мякоти плодов хурмы с использованием ультразвука на основе информации о кинетике и гидродинамике исследуемого массопереноса. Объект исследования – плоды хурмы сортов Хиакуме, Шарон, Королек, выращенные на юге Российской Федерации, в частности в Республике Крым в Национальном научном центре РАН (Никитском ботаническом саду). Полученные данные по выявлению кинетических закономерностей экстракции растворимых в водной среде компонентов из мякоти хурмы, а также по определению коэффициента распределения равновесных концентраций экстрагируемого вещества в обеих фазах позволили выявить рациональную продолжительность экстрагирования как при воздействии на объект ультразвукового воздействия, так и без него, и получить математические зависимости движущей силы процесса, знание которых необходимо для построения математической модели массопереноса.

Ключевые слов: мякоть хурмы, водорастворимые вещества, экстрагирование, статика процесса экстрагирования, равновесные концентрации, коэффициент распределения равновесных концентраций, движущая сила процесса экстрагирования

Для цитирования: Макаров А.Е., Алексанян И.Ю., Нугманов А.Х.-Х., и др. Выявление движущей силы процесса экстрагирования водорастворимых веществ из мякоти хурмы // Вестник КрасГАУ. 2025. № 1. С. 168–182. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-1-168-182.

Artem Evgenievich Makarov¹, Igor Yurievich Aleksanyan², Albert Khamed-Kharisovich Nugmanov³, Pavel Dmitrievich Osmolovsky⁴, Igor Alekseevich Bakin⁵

^{1,2}Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

^{3,5}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

⁴Lipetsk Research Institute of Rape – branch of the All-Russian Research Institute of Oil Crops named after V.S. Pustovoit, Lipetsk, Russia

¹artem.makarov.2011@mail.ru

²16081960igor@gmail.com

³nugmanov@rgau-msha.ru

⁴pavel.osmolovsku@mail.ru

⁵bakin@rgau-msha.ru

IDENTIFICATION OF THE DRIVING FORCE BEHIND THE EXTRACTION OF WATER-SOLUBLE SUBSTANCES FROM PERSIMMON PULP

The aim of the study is to determine the driving force of the process of extraction of water-soluble substances from persimmon pulp based on information about its kinetics and hydrodynamics, as well as to study the statics of this operation, in particular the distribution coefficients of the equilibrium concentrations of the extracted substance in both phases. Tasks: to study the statistical patterns of the operation of extraction of water-soluble substances from persimmon pulp in order to determine the distribution coefficients of the equilibrium concentrations of the extracted substance in both phases, which determines the driving force of the process; to identify the driving force of the process of extraction of water-soluble substances from persimmon pulp without the use of ultrasound based on information about the kinetics and hydrodynamics of the studied mass transfer; to identify the driving force of the process of extraction of water-soluble substances from persimmon pulp using ultrasound based on information about the kinetics and hydrodynamics of the studied mass transfer. The object of the study is persimmon fruits of the Hyakume, Sharon, Korolek varieties, grown in the south of the Russian Federation, in particular in the Republic of Crimea in the National Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Nikitsky Botanical Garden). The obtained data on the identification of kinetic patterns of extraction of components soluble in water from persimmon pulp, as well as on the determination of the distribution coefficient of equilibrium concentrations of the extracted substance in both phases made it possible to identify the rational duration of extraction both with and without exposure to ultrasound, and to obtain mathematical dependencies of the driving force of the process, knowledge of which is necessary for constructing a mathematical model of mass transfer.

Keywords: persimmon pulp, water-soluble substances, extraction, statics of the extraction process, equilibrium concentrations, distribution coefficient of equilibrium concentrations, driving force of the extraction process

For citation: Makarov AE, Aleksanyan IYu, Nugmanov AH-H, et al. Identification of the driving force behind the extraction of water-soluble substances from persimmon pulp. *Bulliten KrasSAU*. 2025;(1):168-182. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-1-168-182>.

Введение. Плоды хурмы имеют широкую перспективу выращивания на юге РФ, в частности, в республике Крым. В Национальном научном центре РАН (Никитском ботаническом саду) с начала прошлого столетия осуществляется работа по интродукции, селекции и исследованию сортов хурмы, что обрисовало возможность расширения географии выращивания данной культуры с использованием новых видов, устойчивых к неблагоприятным природным условиям [1, 2]. Ее плоды являются диетической пищевой продукцией с большой долей биологи-

чески активных соединений и широким перечнем микроэлементов (Ca, Fe, Mg, Na, Zn) и витаминных комплексов (С, А, Р, Е, К), а также полисахаридов и пищевых волокон [3]. При этом поддержание сохранности собранных плодов служит проблемой, вследствие сложности и высоких затрат. По этой причине реализация современных подходов к переработке сырья растительного происхождения и получение на его базе пищевых материалов даст возможность в значительной степени сохранить полезные характеристики плодов хурмы [4, 5].

Интенсификация экстрагирования проводится на основе информации о его кинетике и гидродинамике и обусловлена, в первую очередь, статикой данной операции, то есть коэффициентом распределения равновесных концентраций экстрагируемого вещества в обеих фазах, определяющем движущую силу экстрагирования водорастворимых веществ из мякоти хурмы [6].

Цель исследования: определение движущей силы процесса экстрагирования водорастворимых веществ из мякоти плодов хурмы на основе информации о его кинетике и гидродинамике, а также исследования статики данной операции, в частности коэффициентов распределения равновесных концентраций экстрагируемого вещества в обеих фазах.

Задачи: исследование статистических закономерностей операции экстрагирования водорастворимых веществ из мякоти плодов хурмы с целью определения коэффициентов распределения равновесных концентраций экстрагируемого вещества в обеих фазах, определяющих движущую силу процесса; выявление движущей силы процесса экстрагирования водорастворимых веществ из мякоти плодов хурмы с использованием и без использования ультразвука на основе информации о кинетике и гидродинамике исследуемого массопереноса.

Объекты и методы. Исследование проводилось на кафедре технологических машин и оборудования хранения Астраханского государственного технического университета. Объектом исследования послужили плоды хурмы сортов Хакуме, Шарон, Королек, выращенные на юге Российской Федерации, в частности в Республике Крым в Национальном научном центре РАН (Никитском ботаническом саду).

Отношение равновесных концентраций третьего компонента в двух взаимно нерастворимых жидкостях или в экстракте и рафинате (твердом остатке) при постоянной температуре T называют коэффициентом распределения, рассчитываемого, как

$$\varphi = \frac{x}{y}, \quad (1)$$

где x – равновесное содержание экстрактивных веществ в экстракте, кг/м³; y – равновесное содержание экстрактивных веществ в рафинате, кг/м³.

Значение в процентах равновесного содержания экстрактивных веществ в экстракте для каждого конкретного исследуемого сорта хурмы

было определено ранее, поэтому зная плотность полученного экстракта можно рассчитать при рациональном гидромодуле 1 : 5 величину x , которая является объемным аналогом равновесной концентрации C_3 получаемого экстракта (табл. 1).

Для выявления величины y , которая является разностью между общим содержанием экстрактивных веществ в мякоти хурмы и его количеством, перешедшем в экстракт, необходимо определиться с количеством клетчатки в растительном сырье, так как она не растворима в водной среде. Зная общую долю сухих веществ в мякоти плодов хурмы, пренебрегая другими составляющими исходного сырья, нерастворимыми в воде, ввиду их незначительного количества, можно с приемлемой погрешностью определиться с исходной концентрацией водорастворимых веществ в объекте исследования.

Содержание пищевых волокон в мякоти хурмы определялось путем отделения клетчатки от сопутствующих компонентов (пектиновые гемицеллюлозные, лигниновые комплексы и др.) обработкой мякоти композицией концентрированных азотной и уксусной кислот [7, 8]. По причине окислительной и гидролизной способности азотнокислой среды сопровождающие клетчатку компоненты трансформируются в растворимые в уксусной кислоте комплексы. причем ПВ, которые не подвергаются деструкции при данной обработке, обезвоживают и взвешивают.

По используемой методике мякоть плодов хурмы диспергируют на пластинчатые ломтики высотой до 0,8 см и обезвоживают при $T = 60...75$ °С до воздушно-сухого вида, далее после диспергирования на мельнице пропускают сквозь сито размером отверстий 1 мм, причем не просеянный сложно диспергируемый остаток после его диспергирования вносят в просеянную фракцию и перемешивают. Далее к 1 г образца в емкости с объемом 300...400 см³ добавляют 100 см³ 4 % сернокислого раствора нагретого до T кипения и перемешивают палочкой из стекла. Уровень жидкой среды в емкости отмечают. Композицию перемешивают, доводят до T кипения и кипятят в слабом режиме 10 мин периодически перемешивая, после чего снимают со стенок емкости прилипшие частицы, доводя уровень жидкой среды до метки и не выше. Добавляют 28 см³ 20 % раствора калиевого гидроксида калия и опять 10 мин кипятят. Затем отстаивают осадок и раствор фильтруют посредством пропускания сквозь сухую фильт-

ровальную бумагу. Далее осадок наносят на фильтровальную поверхность и промывают 1 % раствором соляной кислоты дважды по 20 мл. Впоследствии клетчатку трижды промывают горячей водной средой с добавлением по 20 мл диэтилового эфира и этилового спирта для реакции нейтрализации.

Осадочный материал после промывки обезвоживают фильтровальной бумагой и клетчатку сушат при 160 °С до стабилизации ее веса, охлаждают в эксикаторной емкости и определяют его массу. Долю ПВ находят, как

$$ПВ = \frac{a}{b} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где a – масса клетчатки; b – масса изучаемого материала.

Для перевода концентрации водорастворимых веществ, определяемой в процентах, в ее объемный аналог необходимо знать значение физической плотности мякоти хурмы и получаемого рафината, которая может быть найдена экспериментальным путем. Для определения физической плотности фруктовой мякоти и рафината можно воспользоваться пикнометричес-

ким методом, который ранее уже применялся при определении той же характеристики для фруктовых экстрактов. Отличие здесь будет только в использовании пикнометра, который предназначен именно для определения плотности твердых материалов, и эталонной жидкости, в качестве которой применялось рафинированное растительное масло [9, 10]. Физическую плотность ρ_M , кг/м³ вычисляют по формуле

$$\rho_M = \frac{x_2}{\frac{1}{\rho_{см}} - \frac{x_1}{\rho_ж}}, \quad (3)$$

где x_1, x_2 – массовые доли эталонной жидкости и объекта измерения в суспензии, кг/кг; $\rho_{см}, \rho_ж$ – физическая плотность суспензии и эталонной жидкости соответственно, кг/м³.

Результаты и их обсуждение. Результат расчета равновесного содержания экстрактивных веществ в экстракте представлен в таблице 1. Опытные данные по доле пищевых волокон в мякоти хурмы представлены в таблице 2. Опытные данные по физической плотности мякоти хурмы и получаемого рафината представлены в таблице 3.

Таблица 1

Результат расчета равновесного содержания экстрактивных веществ в экстракте
The result of calculating the equilibrium content of extractive substances in the extract

Сорт хурмы	Равновесная концентрация экстракта, %	Плотность экстракта, г/м ³	Равновесная концентрация экстракта, кг/м ³
Хиакуме	4,14	1115	46,16
Шаро	4,09	1108	45,32
Королек	4,17	1122	46,79

Таблица 2

Экспериментальные исследования содержания пищевых волокон в мякоти хурмы
Experimental studies of dietary fiber content in persimmon pulp

Сорт хурмы	Номер опыта	Масса навески исследуемого вещества, г	Масса полученной клетчатки, г	Содержание пищевых волокон, %
1	2	3	4	5
Хиакуме	1	2,711	0,093	3,43
	2	2,544	0,094	3,69
	3	2,639	0,096	3,64
	4	2,485	0,088	3,54
	5	2,671	0,101	3,78
	Среднее значение			
Шарон	1	2,772	0,085	3,07
	2	2,691	0,075	2,79
	3	2,559	0,075	2,93
	4	2,728	0,078	2,86
	5	2,652	0,075	2,83
	Среднее значение			

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Королек	1	2,743	0,092	3,35
	2	2,664	0,083	3,12
	3	2,509	0,081	3,23
	4	2,703	0,089	3,29
	5	2,698	0,091	3,37
	Среднее значение			3,27

Таблица 3

Экспериментальные исследования по определению физической плотности мякоти хурмы
Experimental studies to determine the physical density of persimmon pulp

Сорт хурмы		Физическая плотность мякоти хурмы, кг/м ³					Среднее значение
		Номер опыта					
		1	2	3	4	5	
Хиакуме	мякоть	962	973	968	961	961	965
	рафинат	949	956	954	950	951	952
Шарон	мякоть	968	977	981	971	963	972
	рафинат	963	968	967	970	967	967
Королек	мякоть	975	963	964	972	966	968
	рафинат	962	955	958	960	960	959

Анализ данных таблицы 3 показывает, что показатели физической плотности мякоти и рафината у исследуемых видов хурмы имеют близкие значения, особенно наглядно это видно при рассмотрении результатов не средних, а всех выполненных опытных данных. При этом полученные значения физической плотности для исследуемых мякоти и рафината касаются только их предельных концентраций, а необходимо еще и понимать, как изменяется этот параметр в зависимости от концентрации экстракта. В этом случае достаточным для инженерных расчетов является наличие аддитивных свойств физической плотности, благодаря которым можно линейно описать искомое изменение, зная какая плотность у конечного рафината.

На рисунке 1 представлена графическая зависимость физической плотности фруктовой частички от изменения концентрации водорастворимых веществ в экстракте, которая впоследствии была линейно аппроксимирована для каждого сорта хурмы в отдельности.

Линейная аппроксимация зависимости физической плотности ρ (кг/м³) мякоти хурмы в зави-

симости от концентрации экстракта представлена уравнениями (4)–(6).

Для сортов Хиакуме, Шарон и Королек соответственно

$$\rho_M = 965 - 3,14C_3; \quad (4)$$

$$\rho_M = 972 - 1,22C_3; \quad (5)$$

$$\rho_M = 968 - 2,16C_3; \quad (6)$$

здесь C_3 – концентрация экстрактов из хурмы, %.

Теперь для выявления величины y , которая является разностью между общим содержанием сухих веществ в мякоти хурмы, его количеством перешедшем в экстракт и количеством клетчатки в растительном сырье, все данные имеются. В таблице 4 представлены данные по величине y для каждого исследуемого сорта хурмы, а также численное значение коэффициента распределения φ .

Анализ данных таблицы 4 показывает, что величина φ для исследуемых видов хурмы Хиакуме и Королек имеет одинаковые значения, что объясняется, скорее всего, близкими родственными связями, в отличие от сорта Шарон.

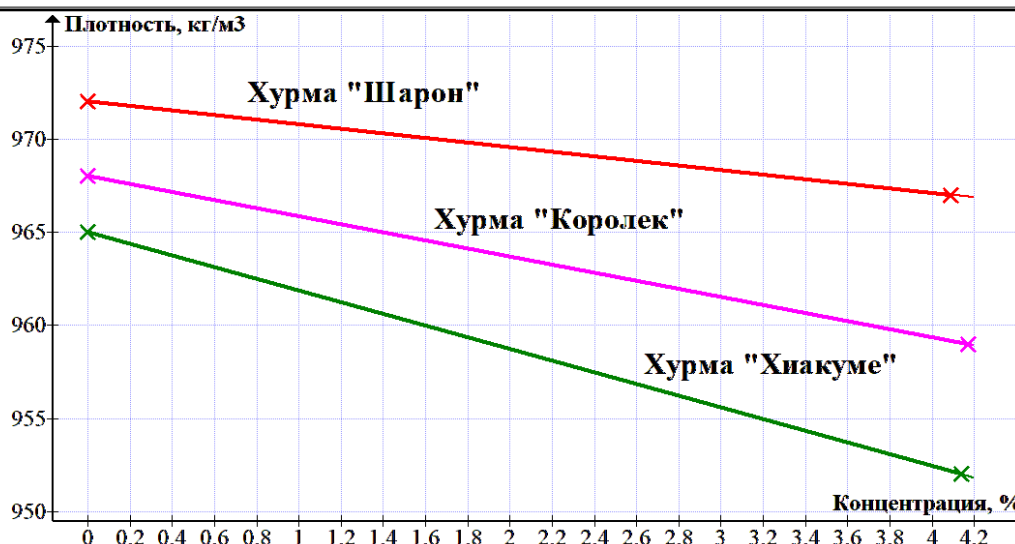


Рис. 1. Изменение физической плотности исследуемой хурмы в зависимости от концентрации экстракта

Change in the physical density of the studied persimmon depending on the extract concentration

Таблица 4

Результат исследования по определению коэффициента распределения
The result of a study to determine the distribution coefficient

Сорт хурмы	x , кг/м³	Общее кол-во сухих веществ в хурме, %	Общее кол-во извлеченных веществ из хурмы, %	Содержания пищевых волокон, %	y , кг/м³	Коэффициент распределения, φ
Хиакуме	46,16	31,56	20,70	3,62	68,92	0,67
Шарон	45,32	33,11	20,45	2,89	94,48	0,48
Королек	46,79	31,44	20,85	3,27	70,20	0,67

Зависимость движущей силы процесса экстракции в системе «жидкость – твердое вещество» ΔC от его продолжительности τ можно получить, принимая, что на границе раздела фаз достигается равновесие и это обуславливает то, что сопротивление массопереносу сквозь границу фазового отсутствует [11, 12], в этом слу-

чае знание величины φ позволит выявить необходимую зависимость: $\Delta C = f(\tau)$. Учитывая это, зависимость движущей силы процесса в дисперсной частичке фруктового сырья (ΔC_q) от его продолжительности можно получить, используя следующее уравнение:

$$\Delta C_q(\tau) = C_q(\tau)_{ядро} - C_q(\tau)_{гран}^* = C_q(\tau)_{ядро} - \frac{C_x}{\varphi}(\tau), \quad (7)$$

где $C_x(\tau)$ – объемная доля экстрактивных компонентов в экстракте в зависимости от длительности операции, кг/м³; $C_q(\tau)_{ядро}$ – она же в центре частички, кг/м³, $C_q(\tau)_{гран}^*$ – она же равновесная на границе со стороны рафината.

Рассмотрим процесс экстрагирования дистиллированной водой дробленой мякоти хурмы

сортов Хиакуме, Шарон и Королек при соотношении сырья к растворителю 1 к 5, температуре экстрагента 98...100 °С, непрерывном помешивании. Изменение $C_q(\tau)_{ядро}$ при экстракции показано в таблице 5.

Таблица 5

$C_{\tau}(\tau)_{\text{ядро}}$ в рафинате
 $C_{\tau}(\tau)_{\text{kernel}}$ in the refinate

$C_{\tau}(\tau)_{\text{ядро}}$, кг/м ³			Время экстракции τ , с
Хиакуме	Шарон	Королек	
269,62	293,74	272,68	0
244,61	275,63	237,46	60
234,33	268,78	232,57	120
227,49	259,49	223,29	180
219,67	253,14	213,07	240
208,46	240,43	206,23	300
141,02	178,03	133,89	600
102,48	133,78	103,44	900
87,12	124,55	86,57	1200
84,72	123,58	83,68	1500
78,97	117,76	77,89	1800
76,58	114,36	75,97	2100
74,19	109,51	74,53	2400
73,71	107,08	73,08	2700
73,23	100,78	72,60	3000
72,27	99,32	72,12	3300
69,88	96,41	70,68	3600

Изменение $C_{\tau}(\tau)_{\text{гран}}^*$ показано в таблице 6.

Для дальнейшего исследования следует отметить, что согласно кривым скорости экстрагирования, полученным ранее на основе кривых

экстрагирования, за рациональную продолжительность процесса резонно принять значение 1200 с, так как дальнейшее проведение массообмена является нецелесообразным.

Таблица 6

Значения $C_{\tau}(\tau)_{\text{гран}}^*$
Meanings $C_{\tau}(\tau)_{\text{gran}}^*$

$C_{\tau}(\tau)_{\text{гран}}^*$, кг/м ³			Время экстракции τ , с
Хиакуме	Шарон	Королек	
0	0	0	0
7,67	7,85	10,94	60
11,03	10,71	12,59	120
13,15	14,96	15,51	180
15,67	17,79	18,91	240
19,28	23,48	21,15	300
42,34	52,48	46,18	600
56,36	74,39	57,34	900
61,91	78,94	63,51	1200
62,85	79,39	64,69	1500
65,01	82,46	66,82	1800
65,91	84,10	67,59	2100
66,91	86,58	68,22	2400
67,18	87,94	68,82	2700
67,39	91,15	69,03	3000
67,51	91,94	69,22	3300
68,57	93,48	69,66	3600

По данным таблиц 5 и 8 проведена графическая интерпретация и аппроксимация изменения объемной концентрации экстрактивных веществ в ядре фруктовой частички и на ее поверхности

при водной экстракции дробленой МПХ сортов Хиакуме, Шарон и Королек, которые в качестве примера приведены на рисунке 2.

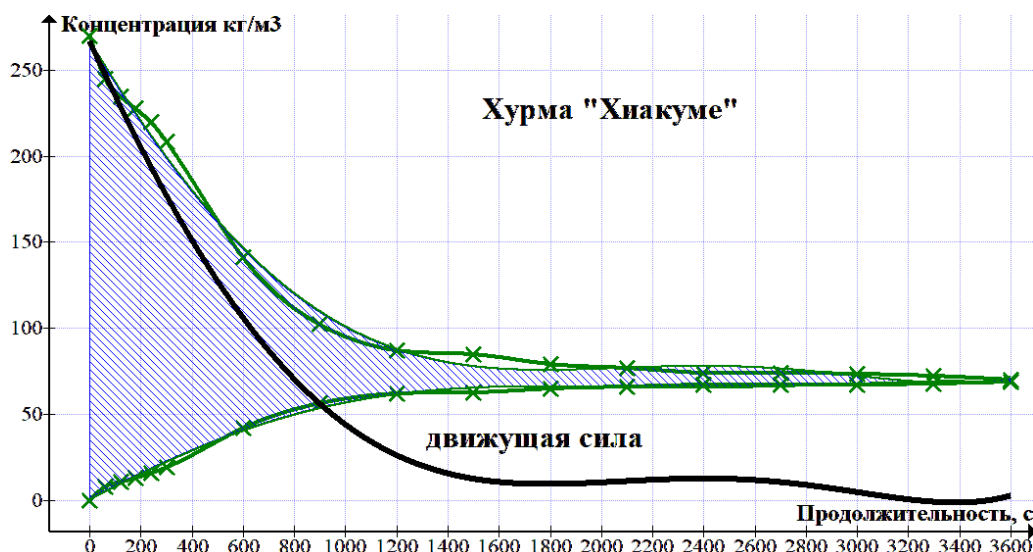


Рис. 2. Изменение движущей силы процесса экстракции водой хурмы сорта Хиакуме в зависимости от продолжительности операции

Changing the driving force of the persimmon variety water extraction process Hiakume depending on the duration of the operation

Ниже представлены аппроксимированные зависимости движущей силы процесса экстракции в частичке дробленой мякоти хурмы

$\Delta C_q(\tau)$ (кг/м³) сорта Хиакуме (8), Шарон (9) и Королек (10):

$$\Delta C_q(\tau) = 3,915 \cdot 10^{-15} \tau^5 - 3,1559 \cdot 10^{-11} \tau^4 + 6,482 \cdot 10^{-8} \tau^3 + 6,1934 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 0,3216 \tau + 266,802 ; \quad (8)$$

$$\Delta C_q(\tau) = 6,408 \cdot 10^{-15} \tau^5 - 5,2988 \cdot 10^{-11} \tau^4 + 1,269 \cdot 10^{-7} \tau^3 - 7,1919 \cdot 10^{-6} \tau^2 - 0,3047 \tau + 295,707 ; \quad (9)$$

$$\Delta C_q(\tau) = 2,649 \cdot 10^{-15} \tau^5 - 1,8815 \cdot 10^{-11} \tau^4 + 1,889 \cdot 10^{-8} \tau^3 + 0,0001317 \tau^2 - 0,359 \tau + 265,16 , \quad (10)$$

где τ – продолжительность массообмена, с.

Известно [13–15], что интенсивность перехода вещества с поверхности частицы мякоти в поток экстрагента или впоследствии экстракта определяется разницей между равновесной граничной $C_3(\tau)_{гран}^*$ и концентрации в потоке

экстракта $C_3(\tau)$, что выходит из уравнения (7), а также кривых экстрагирования. В связи с этим выразить движущую силу процесса в экстракте $\Delta C_3(\tau)$ от его продолжительности можно следующим образом:

$$\Delta C_3(\tau) = C_3(\tau)_{гран}^* - C_3(\tau) = C_q(\tau)_{ядро} \cdot \varphi - C_3(\tau) , \quad (11)$$

где $C_3(\tau)_{гран}^*$, $C_3(\tau)$, $C_q(\tau)_{ядро}$ – соответствующие концентрации, кг/м³.

Результаты изменения $C_3(\tau)$ для изучаемых сортов хурмы в процессе массопереноса приведены в таблице 7.

Изменение $C_3(\tau)_{гран}^*$ показано в таблице 8.

Таблица 7

$C_3(\tau)$ в экстракте
 $C_3(\tau)$ in the extract

$C_3(\tau)$, кг/м ³			Время экстракции τ , с
Хиакуме	Шарон	Королек	
0	0	0	0
5,14	3,77	7,33	60
7,39	5,14	8,44	120
8,81	7,18	10,39	180
10,51	8,54	12,67	240
12,92	11,27	14,17	300
28,37	25,19	30,94	600
37,76	35,71	38,42	900
41,48	37,89	42,55	1200
42,11	38,11	43,34	1500
43,56	39,58	44,77	1800
44,16	40,37	45,29	2100
44,83	41,56	45,71	2400
45,01	42,21	46,11	2700
45,15	43,75	46,25	3000
45,23	44,13	46,38	3300
45,94	44,87	46,67	3600

Таблица 8

$C_3(\tau)_{гран}^*$ в экстракте
 $C_3(\tau)_{гран}^*$ in the extract

$C_3(\tau)_{гран}^*$, кг/м ³			Время экстракции τ , с
Хиакуме	Шарон	Королек	
180,65	140,99	182,70	0
163,89	132,30	159,09	60
157,00	129,01	155,82	120
152,42	124,56	149,61	180
147,18	121,51	142,75	240
139,67	115,41	138,18	300
94,48	85,45	89,71	600
68,66	64,21	69,31	900
58,37	59,78	58,00	1200
56,76	59,32	56,06	1500
52,91	56,52	52,19	1800
51,31	54,89	50,90	2100
49,71	52,56	49,93	2400
49,39	51,40	48,97	2700
49,06	48,37	48,64	3000
48,42	47,68	48,32	3300
46,82	46,28	47,35	3600

По данным таблиц 7 и 8 проведена графическая интерпретация и аппроксимация изменения

$C_3(\tau)$ и $C_3(\tau)_{гран}^*$ во время процесса, которые для примера приведены на рисунке 3.

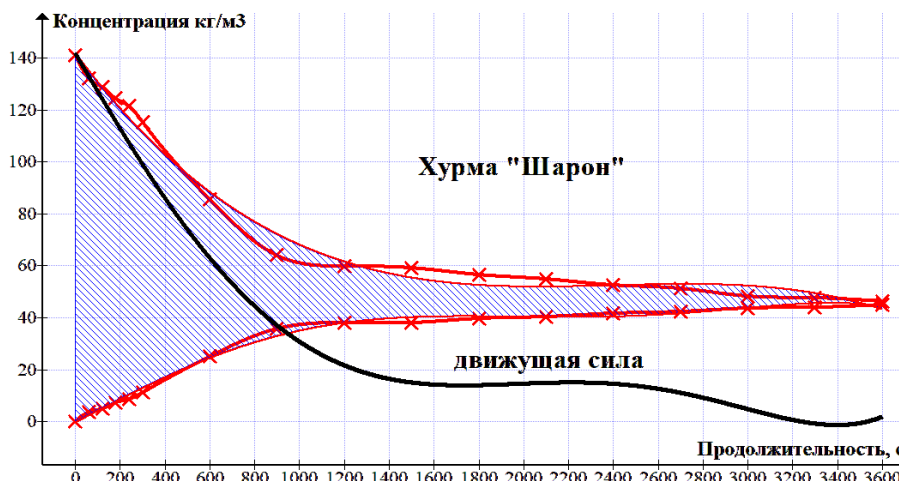


Рис. 3. Изменение движущей силы процесса экстракции водой хурмы сорта Шарон в зависимости от продолжительности операции

Changing the driving force of the Sharon persimmon water extraction process depending on the duration of the operation

Ниже представлены аппроксимированные зависимости движущей силы процесса в водном

экстракте дробленой мякоти хурмы сорта Хиакуме (12), Шарон (13) и Королек (14):

$$\Delta C_3(\tau) = 2,623 \cdot 10^{-15} \tau^5 - 2,1144 \cdot 10^{-11} \tau^4 + 4,343 \cdot 10^{-8} \tau^3 + 4,1495 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 0,2154 \tau + 178,757 ; \quad (12)$$

$$\Delta C_3(\tau) = 3,076 \cdot 10^{-15} \tau^5 - 2,5434 \cdot 10^{-11} \tau^4 + 6,094 \cdot 10^{-8} \tau^3 - 3,4521 \cdot 10^{-6} \tau^2 - 0,1462 \tau + 141,939 ; \quad (13)$$

$$\Delta C_3(\tau) = 1,775 \cdot 10^{-15} \tau^5 - 1,2606 \cdot 10^{-11} \tau^4 + 1,266 \cdot 10^{-8} \tau^3 + 8,8206 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 0,241 \tau + 177,657 , \quad (14)$$

где τ – продолжительность массообмена, с.

Рассмотрим процесс экстрагирования водой дробленной мякоти хурмы сортов Хиакуме, Шарон и Королек при ультразвуковом воздействии с использованием УЗТА-0,4/22-ОМ на максимальной мощности, частоте ультразвука $f = 22 \pm 1.65$ кГц и его интенсивности

а $I \approx 126$ кВт/м², а также: соотношении сырья к растворителю 1 к 5, температуре экстрагента 98...100 °С. Изменение $C_4(\tau)_{ядро}$ в процессе экстрагирования приведено в таблице 9.

Изменение $C_4(\tau)_{гран}^*$ приведено в таблице 10.

Таблица 9

Значения $C_4(\tau)_{ядро}$ в рафинате от времени процесса в интервале от 0 до 600 с
Meanings of $C_4(\tau)_{kernel}$ the core in the refinate depends on the process time in the range from 0 to 600 s

$C_4(\tau)_{ядро}, \text{ кг/м}^3$			Время экстракции $\tau, \text{ с}$
Хиакуме	Шарон	Королек	
1	2	3	4
269,62	293,74	272,68	0
195,79	229,69	192,60	60

Окончание табл. 9

1	2	3	4
130,88	167,32	129,05	120
107,29	140,09	104,89	180
96,72	129,41	96,21	240
88,08	119,69	88,49	300
82,33	109,02	82,23	360
79,93	107,08	79,34	420
76,58	102,72	75,97	480
72,27	99,32	71,64	540
71,32	96,90	69,72	600

Таблица 10

Значения $C_y(\tau)_{гран}^*$ в рафинате
Meanings $C_y(\tau)_{gran}^*$ in the rafinate

$C_y(\tau)_{гран}^*$ кг/м ³			Время экстракции τ , с
Хиакуме	Шарон	Королек	
0	0	0	0
23,54	28,23	25,63	60
46,01	57,79	47,94	120
54,54	71,23	56,70	180
58,41	76,62	60,04	240
61,61	81,52	62,97	300
63,76	86,79	65,19	360
64,69	88,00	66,33	420
65,94	90,17	67,57	480
67,63	92,10	69,24	540
68,06	93,25	70,00	600

По данным таблиц 9 и 10 проведена графическая интерпретация и аппроксимация изменения объемной концентрации экстрактивных веществ в ядре фруктовой частички и на ее поверхности при водной экстракции дробленой мякоти плодов хурмы сортов Хиакуме, Шарон и Королек при интенсивном воздействии ультра-

звука, которые для примера приведены на рисунке 4.

Ниже представлены аппроксимированные зависимости движущей силы процесса экстракции в поле ультразвука в частичке дробленой мякоти хурмы $\Delta C_y(\tau)$ (кг/м³) сорта Хиакуме (15), Шарон (16) и Королек (17):

$$\Delta C_y(\tau) = 8,664 \cdot 10^{-12} \tau^5 - 6,2162 \cdot 10^{-9} \tau^4 - 5,203 \cdot 10^{-6} \tau^3 + 0,0063 \tau^2 - 2,1559 \tau + 271,763 ; \quad (15)$$

$$\Delta C_y(\tau) = 1,235 \cdot 10^{-11} \tau^5 - 1,3596 \cdot 10^{-8} \tau^4 + 2,517 \cdot 10^{-7} \tau^3 + 0,0046 \tau^2 - 2,0168 \tau + 296,354 ; \quad (16)$$

$$\Delta C_y(\tau) = 5,127 \cdot 10^{-12} \tau^5 + 1,0214 \cdot 10^{-9} \tau^4 - 1,049 \cdot 10^{-5} \tau^3 + 0,0079 \tau^2 - 2,3579 \tau + 274,618 , \quad (17)$$

где τ – продолжительность массообмена, с.

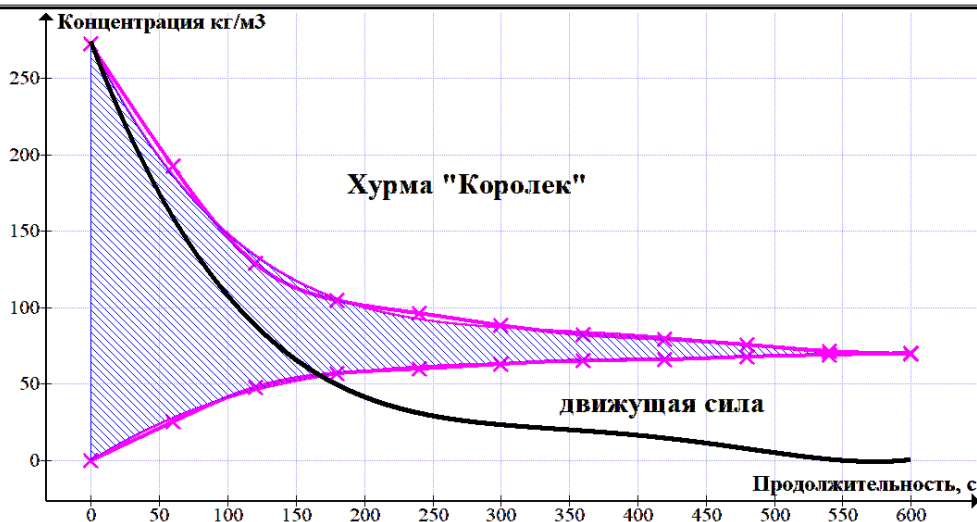


Рис. 4. Изменение движущей силы процесса экстракции водой хурмы сорта Королек в зависимости от продолжительности операции при ультразвуке

Changing the driving force of the persimmon variety water extraction process Korolek, depending on the duration of the operation during with ultrasound

Результат изменения $C_3(\tau)$ для изучаемых сортов хурмы в процессе массопереноса представлен в таблице 11. Величины $C_3(\tau)_{гран}^*$ пока-

заны в таблице 12. Графическая аппроксимация данных таблиц 11 и 12 приведена для примера на рисунке 5.

Таблица 11

Значения $C_3(\tau)$ в экстракте
Meanings $C_3(\tau)$ in the extract

$C_3(\tau)$, кг/м ³			Время экстракции τ , с
Хиакуме	Шарон	Королек	
0	0	0	0
15,77	13,55	17,17	60
30,83	27,74	32,12	120
36,54	34,19	37,99	180
39,13	36,78	40,23	240
41,28	39,13	42,19	300
42,72	41,66	43,68	360
43,34	42,24	44,44	420
44,18	43,28	45,27	480
45,31	44,21	46,39	540
45,60	44,76	46,90	600

Таблица 12

Значения $C_3(\tau)_{гран}^*$ в экстракте
Meanings $C_3(\tau)_{гран}^*$ in the extract

$C_3(\tau)_{гран}^*$, кг/м ³			Время экстракции τ , с
Хиакуме	Шарон	Королек	
1	2	3	4
180,65	140,99	182,69	0
131,18	110,25	129,04	60

1	2	3	4
87,69	80,31	86,46	120
71,88	67,24	70,28	180
64,80	62,12	64,46	240
59,01	57,45	59,29	300
55,16	52,33	55,09	360
53,56	51,39	53,16	420
51,31	49,30	50,90	480
48,42	47,67	47,99	540
47,78	46,51	46,71	600

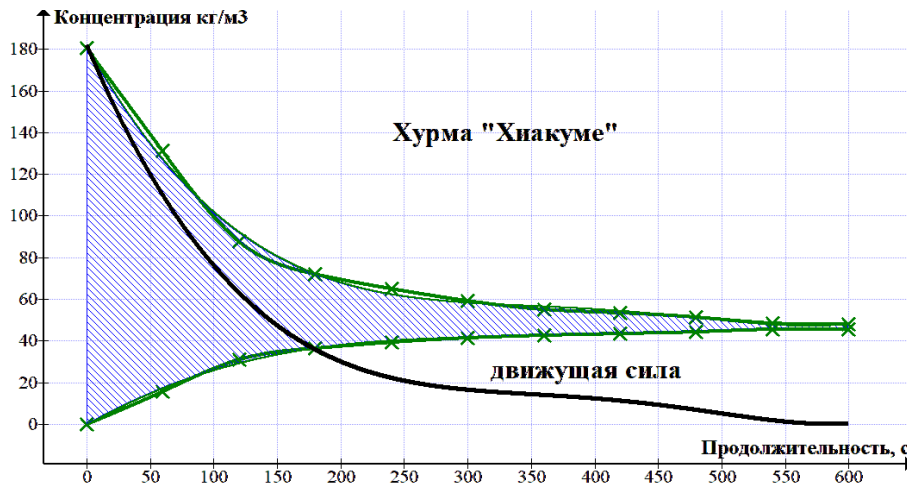


Рис. 5. Изменение движущей силы процесса экстракции водой хурмы сорта Хиакуме в зависимости от продолжительности операции

Changing the driving force of the persimmon variety water extraction process Hiakume depending on the duration of the operation

Ниже представлены аппроксимированные зависимости движущей силы процесса в водном экстракте дробленой мякоти хурмы $\Delta C_3(\tau)$ (кг/м³)

сорта Хиакуме (18), Шарон (19) и Королек (20) в поле ультразвука:

$$\Delta C_3(\tau) = 5,805 \cdot 10^{-12} \tau^5 - 4,1649 \cdot 10^{-9} \tau^4 - 3,486 \cdot 10^{-6} \tau^3 + 0,0042 \tau^2 - 1,4444 \tau + 182,081 ; \quad (18)$$

$$\Delta C_3(\tau) = 5,926 \cdot 10^{-12} \tau^5 - 6,5259 \cdot 10^{-9} \tau^4 + 1,208 \cdot 10^{-7} \tau^3 + 0,0022 \tau^2 - 0,9680 \tau + 142,250 ; \quad (19)$$

$$\Delta C_3(\tau) = 3,435 \cdot 10^{-12} \tau^5 + 6,8433 \cdot 10^{-10} \tau^4 - 7,026 \cdot 10^{-6} \tau^3 + 0,0054 \tau^2 - 1,5798 \tau + 183,994 , \quad (20)$$

где τ – продолжительность массообмена, с.

Заключение. Таким образом, полученные данные по выявлению кинетических закономерностей экстракции растворимых в водной среде компонентов из мякоти хурмы, а также по определению коэффициента распределения равновесных концентраций экстрагируемого веществ-

ва в обеих фазах позволили выявить рациональную продолжительность экстрагирования, как при воздействии на объект ультразвукового воздействия, так и без него, и получить математические зависимости движущей силы процесса, знание которых необходимы для построения математической модели массопереноса.

Список источников

1. Мельников В.А., Хохлов С.Ю., Панюшкина Е.С., и др. Биологически активные вещества в свежих плодах хурмы и продуктах их переработки // Плодоводство и ягодоводство России. 2019. Т. 58. С. 218–225. DOI: 10.31676/2073-4948-2019-58-218-225. EDN: ZBCKRY.
2. Пасенков А.К. Итоги сортоизучения восточной хурмы в Никитском ботаническом саду // Итоги сортоизучения восточной хурмы и маслины на Южном берегу Крыма. Харьков, 1970. С. 5–92.
3. Хохлов С.Ю., Казас А.Н. Хурма. Субтропические плодовые и орехоплодные культуры. Ялта: НБС-ННЦ, 2012. С. 172–192.
4. Khokhlov S.Yu., Melnikov V.A., Paly A.E., et al. Biologically active substances in persimmon varieties bred in Nikita Botanical Gardens // IHC 2018-Symposium 28 International Symposium On Innovative Plant Protection In Horticulture (Istanbul, Turkey, 12–16 August 2018). P. 34. EDN: YRCJZJ.
5. Романков П.Г., Курочкина М.И. Экстрагирование из твердых материалов. Л.: Химия, 1983. 256 с.
6. Остроушко В.Л., Папченко В.Ю. Экстрагирование в системе «твердое тело – жидкость» // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 4, № 6 (58). С. 12–14. EDN: QCFCPT.
7. Кураш М.А., Соколов С.А. Сравнение кинетических моделей экстракции полифенольных соединений из яблочных выжимок // Материалы пула научно-практических конференций. 2023. С. 173–179. EDN: ULMHBC.
8. Гафуров А.Ж., Истоилов Ш.И., Рахматова М.А. Безотходная переработка плодов хурмы // Результаты современных научных исследований и разработок: сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф: в 2 ч. Ч. 1. Пенза, 2018. С. 29–32. EDN: XNKVXN.
9. Определение количества клетчатки в плодах и овощах. URL: <http://comodity.ru/controlkon-serv/qualitymethods/10.html?ysclid=l ye41y8j6f890209093> (дата обращения: 17.05.2024).
10. Бирман А.Р., Узрюмов С.А., Белоногова Н.А., и др. Прибор для определения плотности твердых тел // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 98–101. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-1-98-101. EDN: BXHCBO.
11. Анисович А.Г., Буйницкая А.С. Стандартные методы определения пористости материалов (обзор) // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2015. № 2. С. 30–36. EDN: UAPVSF.
12. Жматова Г.В., Нефедов А.Н., Гордеев А.С., и др. Методы интенсификации технологических процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2005. Т. 11. № 3. С. 701–707. EDN: KAJDMZ.
13. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов. 11-е изд. М.: Альянс, 2005. 753 с. EDN: QNDVFFV.
14. Евсеева С.С. Разработка способа получения экстракта из тутовых плодов и совершенствование процесса его сушки: дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2022. 203 с. EDN: KLPGYC.
15. Андреева Е.В. Научное обоснование процессов комплексной сушильно-экстракционной обработки баклажанной кожуры: дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2021. 211 с. EDN: ICSSKA.

References

1. Melnikov VA, Khokhlov SYu, Panyushkina ES, Melkozherova EA. Biologically active substances in fresh persimmon fruit and the products of their processing. *Pomiculture and small fruits culture in Russia*. 2019;58:218-225. (In Russ.). <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2019-58-218-225>. EDN: ZBCKRY.
2. Pasenkov AK. The results of the variety study of oriental persimmon in the Nikitsky Botanical Garden. *The results of the variety study of oriental persimmons and olives on the Southern coast of Crimea*. Har'kov, 1970. P. 5–92.
3. Hohlov SJu, Kazas AN. Persimmon. Subtropical fruit and nut crops. Jalta: NBS-NNC, 2012. P. 172–192.
4. Khokhlov SYu, Melnikov VA, Paly AE, et al. Biologically active substances in persimmon varieties bred in Nikita Botanical Gardens. *IHC 2018-Symposium 28 International Symposium On Innovative Plant Protection In Horticulture*. (Istanbul, Turkey, 12–16 August 2018). P. 34. EDN: YRCJZJ.

5. Romankov PG, Kurochkina MI. Extraction from solid materials. L.: Himija, 1983. 256 с.
6. Ostroushko VL, Papchenko VJu. Extraction in the solid-liquid system. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. 2012;4(6):12-14. EDN: QCFCPT.
7. Kurash MA, Sokolov SA. Comparison of kinetic models of extraction of polyphenolic compounds from apple pomace. *Materialy pula nauchno-prakticheskikh konferencij*. 2023. P. 173–179. EDN: ULMHBC.
8. Gafurov AJ, Ismoilov ShI, Rakhmatova MA. Non-waste processing of persimmon fruit. *Rezultaty sovremennyh nauchnyh issledovanij i razrabotok: sbornik statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii: in 2 parts. Part 1*. Penza, 2018. P. 29–32. EDN: XNKVXN.
9. Determination of the amount of fiber in fruits and vegetables. URL: <http://comodity.ru/controlkon-serv/qualitymethods/10.html?ysclid=lye41y8j6f890209093> (accessed: 17.05.2024).
10. Birman AR, Ugryumov SA, Belonogova NA, et al. The device for determining the density of solids. *Sistemy. Metody. Tehnologii*. 2020(1):98-101. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-1-98-101>. EDN: BXHCBO.
11. Anisovich AG, Buinitskaya AS. Standard methods for determination of materials porosity (review). *Izvestija Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Serija fiziko-tehnicheskikh nauk*. 2015;(2):30-36. EDN: UAPVSF.
12. Zhmatova GV, Nefedov AN, Gordeev AS, Kilimnik AB. Intensification methods of extracting biologically active substances from vegetative raw materials. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*. 2005;11(3):701-707. EDN: KAJDMZ.
13. Kasatkin AG. Basic processes and devices of chemical technology: ucheb. dlja vuzov. 11th ed. M.: Al'jans, 2005. 753 p. EDN: QNDVVF.
14. Evseeva SS. Razrabotka sposoba polucheniya `ekstrakta iz tutovyh plodov i sovershenstvovanie processa ego sushki: dis. ... kand. tehn. nauk. Astrahan', 2021. 203 p. EDN: KLPGYC.
15. Andreeva EV. Nauchnoe obosnovanie processov kompleksnoj sushil'no-`ekstrakcionnoj obrabotki baklazhannoj kozhury: dis. ... kand. tehn. nauk. Astrahan', 2021. 211 p. EDN: ICSSKA.

Статья принята к публикации 05.11.2024 / The article accepted for publication 05.11.2024.

Информация об авторах:

Артем Евгеньевич Макаров¹, соискатель, прикрепленный к кафедре технологических машин и оборудования

Игорь Юрьевич Алексанян², профессор кафедры технологических машин и оборудования, доктор технических наук, профессор

Альберт Хамед-Харисович Нугманов³, профессор кафедры технологии хранения и переработки плодовоовощной и растениеводческой продукции, доктор технических наук, профессор

Павел Дмитриевич Осмоловский⁴, младший научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства рапса, кандидат сельскохозяйственных наук

Игорь Алексеевич Бакин⁵, заведующий кафедрой процессов и аппаратов перерабатывающих производств, доктор технических наук, профессор

Information about the authors:

Artem Evgenievich Makarov¹, Applicant attached to the Department of Technological Machines and Equipment

Igor Yurievich Aleksanyan², Professor at the Department of Technological Machines and Equipment, Doctor of Technical Sciences, Professor

Albert Khamed-Kharisovich Nugmanov³, Professor at the Department of Technology of Storage and Processing of Fruit and Vegetable and Plant Products, Doctor of Technical Sciences, Professor

Pavel Dmitrievich Osmolovsky⁴, Junior Researcher, Laboratory of Rape Breeding and Seed Production, Candidate of Agricultural Sciences

Igor Alekseevich Bakin⁵, Head of the Department of Processes and Apparatus for Processing Industries, Doctor of Technical Sciences, Professor