

Расчет энергетических затрат тонкого измельчения растительных материалов

Родионов Ю.Ю., Скоморохова А.И., Родионов Ю.В., Рыбин Г.В., Алексенцев Д.С.

Аннотация. В настоящее время плодоовощные порошки находят широкое применение в функциональных продуктах питания и лекарственных препаратах. Получение растительных порошков осуществляется путем сушки исходного материала и его последующим измельчением. На первом этапе применяется двухступенчатая вакуумно-импульсная сушилка, так как она позволяет сохранить большее количество сухих веществ. При хранении высушенных плодоовощных продуктов в необходимых условиях, их первоначальные полезные свойства не утрачиваются до 6 месяцев, а по истечении данного срока еще до 12 месяцев способны сохранять до 50% своих свойств. Для исследования процессов сушки применялись образцы следующих растительных продуктов: перец «Ласточка»; томат «Черный мавр»; чеснок «Юбилейный»; яблоки сортов «Антоновка обыкновенная», «Богатырь», «Жигулёвское», «Лобо»; тыква «Мичуринская». В статье представлены результаты сушки тыквы и усредненные результаты, полученные при сушке яблок (образцы были взяты одинаковой массы и толщиной нарезки по 5 ± 1 мм). Измельчение проводилось с помощью двухступенчатой дисково-шаровой мельницы с вакуумным удалением растительных частиц заданной степени помола. Авторами предложена методика вычисления энергетических затрат процесса. Исходя из экспериментальных исследований получено несколько факторов, способствующих снижению энергозатрат. Рассмотрены зависимости, по которым можно провести качественное сравнение измельчающих установок, а также рассчитать и спроектировать оборудование для эффективного измельчения. Предложена формула вычисления коэффициента эффективности, позволяющего анализировать и выбирать оборудование для измельчения сухого растительного сырья тонкого и сверхтонкого помола. На основании полученных значений коэффициента качества выбирается наиболее подходящее оборудование для измельчения сухого растительного сырья. По результатам исследований сделаны выводы.

Ключевые слова: измельчение, растительные материалы, энергетические затраты, степень помола, коэффициент эффективности измельчения.

Для цитирования: Родионов Ю.Ю., Скоморохова А.И., Родионов Ю.В., Рыбин Г.В., Алексенцев Д.С. Расчет энергетических затрат тонкого измельчения растительных материалов // Инновационная техника и технология. 2020. № 2 (23). С. 34–41.

Calculation of energy costs of fine grinding of vegetable materials

Rodionov Yu. Yu., Skomorokhova A. I., Rodionov Yu. V., Rybin G. V., Aleksentsev D. S.

Abstract. Currently, fruit and vegetable powders are widely used in functional foods and medicines. Obtaining plant powders is carried out by drying the source material and its subsequent grinding. At the first stage, a two-stage vacuum-pulse dryer is used, since it allows you to save more solids. When storing dried fruit and vegetable products under the necessary conditions, their initial useful properties are not lost until 6 months, and after this period up to 12 months are able to retain up to 50% of their properties. To study the drying processes, samples of the following plant products were used: «Swallow» pepper; tomato «Black Moor»; garlic «Jubilee»; apples of the varieties Antonovka vulgaris, Bogatyr, Zhigulevskoye, Lobo; pumpkin «Michurinsky». The article presents the results of drying pumpkins and the average results obtained by drying apples (samples were taken of the same mass and a slicing thickness of 5 ± 1 mm). Grinding was carried out using a two-stage disk-ball mill with vacuum removal of plant particles of a given degree of grinding. The authors proposed a methodology for calculating the energy costs of a process. Based on experimental studies, several factors have been obtained that contribute to reducing energy costs. The dependences are examined, according to which a qualitative comparison of grinding plants can be carried out, as well as to calculate and design equipment for effective grinding. A formula for calculating the efficiency coefficient is proposed, which allows one to analyze and select equipment for grinding dry plant materials of

fine and ultrafine grinding. Based on the obtained values of the quality factor, the most suitable equipment for grinding dry plant materials is selected. Based on the results of the research, conclusions are drawn.

Keywords: grinding, plant materials, energy costs, degree of grinding, grinding efficiency coefficient.

For citation: Rodionov Yu. Yu., Skomorokhova A. I., Rodionov Yu. V., Rybin G. V., Aleksentsev D. S. Calculation of energy costs of fine grinding of vegetable materials. *Innovative Machinery and Technology*. 2020. No. 2 (23). pp. 34–41. (In Russ.).

Введение

С точки зрения содержания минеральных солей, витаминов, хлорофилла, ферментов, легкоусвояемых сахаров, антибиотиков, вкусовых, ароматических и других питательных веществ необходимых для организма человека овощи и фрукты являются важной частью питания по современным научным данным [1]. В настоящее время существуют рекомендации: потреблять фруктов и овощей по отдельности до 350 граммов в различном виде. Это обуславливается богатым биологическим составом [2]. Фрукты и овощи являются стимуляторами пищеварения, как продукты, обладающие свойствами, позволяющими оказывать возбуждающее действие на секретную функцию пищеварительных желез, также

сохраняют эту способность при различных формах их обработки (мок, пюре, супы и т.д.). Одним из уникальных их свойств является также способность повышать усвояемость жиров, белков и углеводов [3].

В настоящее время плодоовощные порошки широко применяются в функциональных продуктах питания и лекарственных препаратах. Так, например, чесночный порошок применяется в белково-витаминно-минеральных концентратах (БВМК) [4], макаронных изделиях [5] вкусовых добавках, также для этих целей применяются порошки из тыквы, свеклы, яблок. Их добавление в лекарственные препараты обусловлено химическим составом, который богат важными для человеческого организма витаминами, минералами, микро- и макроэлементами.

Следует отметить, что при превращении растительного сырья в порошковую продукцию на каждом этапе должны соблюдаться свои требования. Это говорит о том, что цепочка технологических процессов выстраивается обратно движению сырья. Последним этапом в данном производстве является измельчение, которому всегда предшествует сушка. Для многих плодов и овощей в НОЦ ТГТУ-МичГАУ «Экотехнологии им. Ю.Г. Скрипникова» разработаны различные типы наиболее эффективных сушильных установок. Предложенные сушильные установки объединены следующими принципами: двухступенчатость и использование вакуума во второй ступени. [6, 7]. За последние годы был

разработан ряд их модификаций, в зависимости от геометрических форм и размеров, химико-биологического состава [8]. Основными параметрами сушильных установок являются максимальная скорость удаления влаги и сохранение биологически активных веществ (БАВ). Это определяет главное преимущество получаемого сушеного полуфабриката.

Для исследования сушки растительных продуктов ЦЧР, рассмотрим наиболее распространенные из них в районе и сравним два вида сушки [9, 10, 11]. Пример экспериментально полученных данных о биологической ценности тыквы сорта «Мичуринска» и усредненные показатели результатов сушки яблок четырех различных сортов (взяты по одинаковой массе и толщине нарезки по 5 ± 1 мм) приведены в таблице 1.

Анализ проводился на образцах следующих растительных продуктов: перец «Ласточка»; томат «Черный мавр»; чеснок «Юбилейный»; яблоки сортов «Антоновка обыкновенная», «Богатырь», «Жигулёвское», «Лобо»; тыква «Мичуринская». По результатам, представленным в таблице, видно, что наиболее эффективной является двухступенчатая конвективно-вакуумная сушка.

Сохраняемые в необходимых условиях высушенные плоды и овощи не теряют своих свойств до 6 месяцев, а после до 12 месяцев до 50%. Дробление и размол относятся к процессам механического измельчения твердых веществ, в нашем случае растительных плодовоовощных продуктов. Измельчение увеличивает поверхность обрабатываемого материала, что важно для производительности дальнейших процессов, таких как биохимических и диффузионных. То есть необходимое измельчение является важной стадией получения растительных порошков и дальнейшее их использование.

Целью работы являлось определение зависимости энергетических затрат измельчения сухих растительных материалов и выбор рациональных технологических приемов.

Объекты и методы исследований

Для получения теоретических зависимостей мелкого и сверхмелкого помола сухих растительных материалов, выращиваемых в ЦЧР, использо-

Таблица 1 – Сравнительный анализ видов сушки яблок и тыквы

Показатель качества	До сушки	После сушки	
		Конвективная сушка	ДКВИ-сушка
СУШЕНЫЕ ЯБЛОКИ			
Сухие вещества, %	13,7	88,4	89,7
Антиоксидантная активность, мг рутина в 100 г водного экстракта	73,8	105,7	126,51
Белок, мг/%	0,4	1,3	2,2
Катехины, мкг/%	201	1164	1272
Сумма усвояемых углеводов, %	9,8	54,6	59,9
Органические кислоты, %	0,8	2,1	2,3
Пищевые волокна, %	1,8	10,9	11,3
Витамин С, мг/%*	10,3	3,4	39,6
Общее количество золы, %	0,5	2,61	2,58
СУШЕНАЯ ТЫКВА			
Сухие вещества, %	17,41	89,11	91,47
Сумма пектиновых веществ, %	1,74	7,66	8,12
Сумма каратиноидов, мг/%	4,17	28,14	30,73
Сумма растворимых сахаров, %	1,74	16,98	18,5
Глюкоза, %	0,27	1,07	1,27
Витамин С, мг/%	28	55,6	96,9
Сахароза, %	0,54	4,8	4,92
Фруктоза, %	0,93	11,11	12,31
Крахмал, %	1,24	4,05	4,49
Дубильные вещества, мг/%	0,33	2,37	3,19
Биофлавоноиды, мг/%	261,7	1787,6	1948,4
Общее количество золы, %	1,07	7,23	7,48

вались разработки напечатанные, опубликованные в источниках [12, 13, 14, 15].

Результаты и их обсуждение

В результате экспериментальных исследований получено несколько факторов, ведущих к снижению энергозатрат:

- продукт перед измельчением должен правильно высушен по подобранной технологии сушки для конкретного вида растительного сырья;
- влажность сушеного сырья для измельчения должна составлять 3%-4%.
- после сушки идти быстро процесс измельчения или сушеная продукция должна закладываться на хранение, не успев набрать влагу из-за адсорбционных свойств растительного сырья;
- оборудование измельчение растительного сырья следует правильно подбирать, согласно виду.

Процесс получения порошков тонкого и сверхтонкого помола является сложным. Анализ существующих типов оборудования для измельчения растительных продуктов в такой порошок (тонкий и сверхтонкий), определен, в первую очередь, их физико-механическими свойствами. Экспериментальным путем было выделено несколько ти-

пов оборудования, подходящих для данной задачи. К ним относятся мельницы шаровые, струйные и криомельницы.

Одной из главных задач теории измельчения, особенно сухих растительных веществ, является определение количества энергии, которая затрачивается на процесс.

Процесс измельчения с точки зрения физической модели описывается как разрушение объектов под действием внешних сил при напряжениях, превышающих предел прочности. При этом внешние силы прикладываем до того момента, пока будут получены все частицы с заданным размером d , если позволяет выбранный способ.

Математическую модель определения энергии измельчения базируем на следующих допущениях:

- при однократном разрушении объемная степень измельчения остается постоянной при любом размере куска;
- тело при измельчении считаем однородным, абсолютно упругим и делившимся по определенному закону.

Различают следующие степени измельчения: линейную ($i = d_k / d_n$) и объемную ($a = v_k / v_n$). Здесь d – размер кусков в м, v – их объем в м³, индексы «к» и «н» и

«к» обозначают параметры до и после измельчения соответственно.

Характеристику геометрических параметров измельчаемого растительного материала определяем по размеру сита, используя понятие наибольшего куска. Крупность кускового и порошкообразного материалов характеризуем разными способами [12].

При анализе полученного материала использовались приборы и методы, которые позволяют определить фракционный (гранулометрический) состав, а также удельную поверхность кускового и порошкообразного материалов. Данные приборы и методы представлены в литературе, ссылки на которую приведены в книге [13].

Воспользуемся следующими определениями и зависимостями для анализа, расчета и проектирования оборудования для эффективного измельчения:

- определение среднего объема кусков проведем, следующим образом:

- первое разрушение куба по зависимости:

$$d_1^3 = v_1 = \frac{D^3}{r} \quad (1)$$

где D – первоначальный размер частиц, м; r – степень измельчения в каждой стадии.

- второе разрушение куба соответственно по зависимости:

$$d_2^3 = v_2 = \frac{D^3}{r^2} \quad (2)$$

- при n -ом разрушении зависимость примет вид:

$$d^3 = v_n = \frac{D^3}{r^n} \quad (3)$$

Или

$$r^n = \frac{D^3}{d^3} = i^3 = a, \quad (4)$$

где a – объемная степень измельчения.

Данная методика предоставляет возможность определить необходимое количество приемов разрушения для того, чтобы измельчить куб, первоначальный размер которого равнялся D , в кубики размером d по формуле:

$$n = \frac{\log a}{\log r} = \frac{3(\lg D - \lg d)}{\lg r}. \quad (5)$$

Объем измельчения считаем, как:

$$v = D^3 - d^3 \quad (6)$$

При измельчении энергетические расходы можно разделить на три основных вида: затраты на теплоту деформирования материала, на образова-

ние новой поверхности и на теплоту трения материала по поверхностям устройства. Следовательно, энергия представляет собой сумму работ, которые затрачиваются на деформацию тела, на образование новых поверхностей и тепловые потери:

$$A = \frac{\sigma_{сж.р}^2 \cdot v}{2E} + k_r F + \Delta A_T \quad (7)$$

где $\sigma_{сж.р}$ – предел прочности от напряжения сжатия (растяжения) сухого растительного материала Па;

k_r – коэффициент пропорциональности;

F – площадь образованной при разрушении поверхности растительного тела, м²;

ΔA – работа тепловых потерь, Дж.

Энергию процесса, которая затрачивается на процесс измельчения, представляем как сумму работ затраченных на каждом приеме разрушения с учетом тепловой работы:

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_n = k_0 D^{2.5} \left[1 + (i_0^{0.5})^1 + \left((i_0^{0.5})^2 + \dots + (i_0^{0.5})^{n-1} \right) \right] + \sum_n^i A_{Ti} \quad (8)$$

$$A_0 = \frac{k}{(i_0^{3-m} - 1) \rho} \left(\frac{1}{d^{3-m}} - \frac{1}{D^{3-m}} \right) G + \sum_n^i A_{Ti} \quad (9)$$

где ρ – плотность растительного материала, кг/м³;

m – показатель степени;

G – вес растительного материала, кг.

Работу однократного разрушения тела объемом v определим введя вместо текущего напряжения предел прочности $\sigma_{сж.р}$:

$$A_0 = \frac{\sigma_{сж.р}^2 \cdot v}{2E} + \Delta A_{T0}. \quad (10)$$

Число стадий разрушения, которое необходимо осуществить для достижения заданного размера частиц d из первоначального их размера, соответствующего величине D , обозначим n . При однократном разрушении a_0 эта величина будет определяться следующим образом: при n -кратном разрушении тела количество частиц, имеющих размер d , равно a_0^n . Объемную степень этих частиц запишем как:

$$\frac{D^3}{d^3} = i^3 = a_0^n \quad (11)$$

откуда $3lgi = n lga_0$ или $n = \frac{3lgi}{lga_0}$.

Суммарная работа этой операции, равна:

$$A = \left(\frac{\sigma_{сж.р}^2 D^3}{2E} \right) \left(\frac{3lgi}{lga_0} \right) + \Delta A_T. \quad (12)$$

Чтобы определить полученную при этом новую поверхность, необходимо поверхности, полученные при каждом приеме разрушения, суммировать, то есть

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n = 6D^2 (i_0 - 1) (1 + i_0 + i_0^2 + i_0^3 + \dots + i_0^{n-1}). \quad (13)$$

Выражение во второй скобке представляет собой геометрическую прогрессию со знаменателем i_0 , сумма членов которой запишем, как:

$$S = \frac{(i_0^n - 1)}{(i_0 - 1)}. \quad (14)$$

Тогда представим:

$$E = 6D^2 (i_0^n - 1), \quad (15)$$

Средний поверхностный удельный расход энергии определим следующим образом:

$$A_{y.c} = \frac{A}{E} = \left[\frac{\sigma_{сж.р}^2 D^3}{12ED^2 (i_0^n - 1)} \right] \left(\frac{3lgi}{lga_0} \right) = \frac{\sigma_{сж.р}^2 D lgi}{4E (i_0^n - 1) lga_0} + \Delta A_{T.y.c}, \quad (16)$$

где $i_0 = \sqrt[3]{a_0}$ и $n = \frac{3lgi}{lga_0}$.

Предложенные зависимости позволяют провести качественное сравнение измельчающих установок, а также получить практические рекомендации:

- измельчение проводим после предварительного грохочения (просеивания);
- степень измельчения является основным показателем процесса;
- при измельчении работа должна быть направлена на преодоление сил сцепления между частицами, измельчаемого растительного материала;
- при осуществлении тонкого и сверхтонкого помола процесс необходимо проводить в несколько приемов, то есть он должен быть ступенчатым.

При проведении процесса измельчения сухих твердых растительных материалов требуются дополнительные условия:

Список литературы

- [1] Иванова Е.П., Митрохин М.А., Перфилова О.В., Родионов Ю.В., Скрипников Ю.Г. Разработка технологии закваски для производства хлеба функционального назначения // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № 1 (50). – С. 260-264.

- величины измельченных растительных материалов должны быть максимально равномерны;

- удаление до заданной степени измельчения из зоны процесса сухих твердых растительных материалов должно быть быстрым;

- проведение измельчения по режимным параметрам растительных материалов, не должны вызывать потерю БАВ;

- регулирования степени измельчения в зависимости от назначения;

- ремонтпригодности и технологичности оборудования.

В результате получен коэффициент эффективности измельчения, который запишем зависимостью:

$$K_{эф.изм} = \frac{\Pi}{M_0 M_C \Theta_3} \cdot K_{бав} \cdot 0,1L, \quad (17)$$

где Π – производительность установки, руб.;

M_0 – стоимость оборудования, руб.;

M_C – стоимость сырья, руб.;

Θ_3 – энергетические затраты, руб.;

$K_{бав}$ – коэффициент сохранности БАВ, руб.;

L – степень помола.

Предложенная формула позволяет сравнивать, анализировать и выбирать оборудование для измельчения сухого растительного сырья тонкого и сверхтонкого помола.

Выводы

По результатам проделанной работы в данной статье отражена важность применения порошков из растительного сырья для пищевой и фармацевтической отраслей народного хозяйства, а также для АПК. Показана важность применения для процесса измельчения предварительная двухступенчатая конвективно-вакуумная сушка, позволяющая сохранить большее количество питательных веществ по сравнению с сушкой конвективной. Теоретически определены зависимости затрат энергии тонкого и сверхтонкого помола растительных материалов и экспериментально установлены факторы, ведущие к снижению энергозатрат производства порошковой продукции из растительного материала. Предложены практические рекомендации для выбора наиболее эффективного оборудования.

- [2] Химический состав российских пищевых продуктов: Справочник / Под ред. член-корр. МАИ, проф. И.М. Скурихина и академика РАМН проф. В.А. Тутельяна. – М.: ДеЛи принт, 2002. 236 с.
- [3] Крылова В.Б., Густова Т.В., Манджиева Н.Н. Использование нетрадиционного животного сырья в технологии мясных и мясорастительных консервов // Мясная индустрия. – М: Редакция журнала «Мясная индустрия», 2010. – № 11. – С. 20-23.
- [4] Речкалов А.В., Шубина Н.И. Технология производства адресных БВМК для молодняка крупного рогатого скота // Развитие научной, творческой и инновационной деятельности молодежи. Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2018. – С. 140-144.
- [5] Родионов Ю.В., Данилин С.И., Митрохин М.А., Утешев М.В., Мочалин Н.Н., Иванова И.В. Влияние порошка пастернака на качественные показатели лапши и макаронных изделий // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2017. – № 1 (50). – С. 56-61.
- [6] Попова И.В., Родионов Ю.В., Щербаков С.А., Однолько В.Г., Скрипников Ю.Г., Митрохин М.А. Математическое моделирование комбинированной конвективной вакуумимпульсной сушки растительных продуктов // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета, 2008. – № 1. – С. 60-65.
- [7] Родионов Ю.В., Свиридов М.М., Никитин Д.В. Влияние конструктивно-технологических параметров на эффективность работы жидкостнокольцевых вакуум-насосов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2007. – Т. 50. № 5. – С. 102-104.
- [8] Зорин А.С. Совершенствование технологии и технических средств комбинированной вакуумной сушки растительного сырья для производства чипсов: автореф. дис. канд. технических наук. Мичуринск, 2019. – С. 16.
- [9] Попова И.В. Совершенствование технологии и средств сушки овощного сырья: дис. канд. техн. наук. Мичуринск, 2009. – 141 с.
- [10] Выращивание и комплексная переработка тыквы сорта Мичуринская / И. В. Иванова, Ю. В. Родионов, С. И. Данилин, Д. В. Никитин; научный редактор И. В. Иванова; Министерство сельского хозяйства РФ, Мичуринский государственный аграрный университет. – Мичуринск: Мичуринский ГАУ, 2019. – 113 с.
- [11] Родионов Ю.В., Попова И.В., Шацкий Д.А. Сравнительный анализ эффективности сублимационной и двухступенчатой конвективной вакуум-импульсной сушки // Труды международного технического семинара. К 100-летию А.В. Лыкова. – Воронеж, 2010. – С. 160-167.
- [12] Ходаков, Г. С. Физика измельчения. – М.: «Наука», 1972. – 306 с.
- [13] Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – М.: «Химия», 1977. – 368 С.
- [14] Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: «Химия», 1973. – 752 с.
- [15] Валентас К.Дж., Ротштейн Э., Синх Р.П. Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов / пер. с англ. под общ. науч. ред. А.Л. Ишевского. – СПб: Профессия, 2004. – 848 С.

References

- [1] Ivanova E.P., Mitrokhin M.A., Perfilova O.V., Rodionov Yu.V., Skripnikov Yu.G. Razrabotka tekhnologii zakvaski dlya proizvodstva khleba funktsional'nogo naznacheniya [Development of fermentation technology for the production of functional bread], Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo, 2014, no. 1 (50), pp. 260-264.
- [2] Khimicheskii sostav rossiiskikh pishchevykh produktov: Spravochnik [The Chemical Composition of Russian Food Products: A Handbook], pod red. chlen-korr. MAI, prof. I.M. Skurikhina i akademika RAMN prof. V.A. Tutel'yana, M.: DeLi print, 2002, 236 p.
- [3] Krylova V.B., Gustova T.V., Mandzhiyeva N.N. Ispol'zovanie netraditsionnogo zhivotnogo syr'ya v tekhnologii myasnykh i myasorastitel'nykh konservov [The use of non-traditional animal raw materials in the technology of canned meat and meat and vegetable], Myasnaya industriya, M: Redaktsiya zhurnala «Myasnaya industriya», 2010, no. 11, pp. 20-23.
- [4] Rechkalov A.V., Shubina N.I. Tekhnologiya proizvodstva adresnykh BVMK dlya molodnyaka krupnogo rogatogo skota [Production technology of targeted BVMK for young cattle], Razvitie nauchnoi, tvorcheskoi i innovatsionnoi deyatel'nosti molodezhi. Kurgan: Kurganskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaistvennaya akademiya im. T.S. Mal'tseva, 2018, pp. 140-144.
- [5] Rodionov Yu.V., Danilin S.I., Mitrokhin M.A., Uteshev M.V., Mochalin N.N., Ivanova I.V. Vliyanie poroshka pasternaka na kachestvennye pokazateli lapshi i makaronnykh izdelii [The effect of parsnip powder on the quality of noodles and pasta], Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya, 2017, no. 1 (50), pp. 56-61.
- [6] Popova I.V., Rodionov Yu.V., Shcherbakov S.A., Odnol'ko V.G., Skripnikov Yu.G., Mitrokhin M.A. Matematicheskoe modelirovanie kombinirovannoi konvektivnoi vakuuimpul'snoi sushki rastitel'nykh

- produktov [Mathematical modeling of combined convective vacuum-impulse drying of plant products], Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2008, no. 1, pp. 60-65.
- [7] Rodionov Yu.V., Sviridov M.M., Nikitin D.V. Vliyanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov na effektivnost' raboty zhidkostnokol'tsevykh vakuum-nasosov [The influence of structural and technological parameters on the performance of liquid ring vacuum pumps], Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. 2007, T. 50, no. 5, pp. 102-104.
- [8] Zorin A.S. Sovershenstvovanie tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv kombinirovannoi vakuumnoi sushki rastitel'nogo syr'ya dlya proizvodstva chipsov: avtoref. dis. kand. tekhnicheskikh nauk [Improving the technology and technical means of combined vacuum drying of vegetable raw materials for the production of chips. autoref. dis. Cand. technical sciences]. Michurinsk, 2019, 16 p.
- [9] Popova I.V. Sovershenstvovanie tekhnologii i sredstv sushki ovoshchnogo syr'ya: dis. kand. tekhn. Nauk [Improving the technology and means of drying vegetable raw materials: dis. Cand. tech. of sciences] Michurinsk, 2009, 141 s.
- [10] Vyrashchivanie i kompleksnaya pererabotka tykvy sorta Michurinskay [Growing and complex processing of pumpkins of the Michurinskaya variety], I. V. Ivanova, Yu. V. Rodionov, S. I. Danilin, D. V. Nikitin; nauchnyi redaktor I. V. Ivanova; Ministerstvo sel'skogo khozyaistva RF, Michurinskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet. Michurinsk: Michurinskii GAU, 2019, 113 s.
- [11] Rodionov Yu.V., Popova I.V., Shatskii D.A. Sravnitel'nyi analiz effektivnosti sublimatsionnoi i dvukhstupenchatoi konvektivnoi vakuum-impul'snoi sushki [Comparative analysis of the effectiveness of freeze-drying and two-stage convective vacuum-pulse drying], Trudy mezhdunarodnogo tekhnicheskogo seminara. K 100-letiyu A.V. Lykova, Voronezh, 2010, pp. 160-167.
- [12] Khodakov, G. S. Fizika izmel'cheniya [Grinding Physics], M.: «Nauka», 1972. 306 p.
- [13] Sidenko P.M. Izmel'chenie v khimicheskoi promyshlennosti [Chemical industry grinding], M.: «Khimiya», 1977, 368 p.
- [14] Kasatkin A.G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii [Basic processes and apparatuses of chemical technology], M.: «Khimiya», 1973, 752 p.
- [15] Valentas K.Dzh., Rotshtein E., Sinkh R.P. Pishchevaya inzheneriya: spravochnik s primerami raschetov [Food Engineering: A Handbook of Calculation Examples] per. s angl. pod obshch. nauch. red. A.L. Ishevskogo, SPb: Professiya, 2004, 848 p.
- [16]

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Родионов Юрий Юрьевич аспирант кафедры «Технологии производства, хранения и переработки продукции растениеводства» ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет» 393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101 Тел.: +7(475) 263-04-59 E-mail: five-elements90@mail.ru</p>	<p>Rodionov Yuri Yuryevich postgraduate student of the department «Technologies for the production, storage and processing of crop products» Michurinsky State Agrarian University Phone: +7(475) 263-04-59 E-mail: five-elements90@mail.ru</p>
<p>Скоморохова Анастасия Игоревна студент кафедры «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112 Тел.: +7(475) 263-04-59 E-mail: nasta373@mail.ru</p>	<p>Skomorokhova Anastasia Igorevna student of the department «Mechanics and engineering graphics» Tambov State Technical University Phone: +7(475) 263-04-59 E-mail: nasta373@mail.ru</p>
<p>Родионов Юрий Викторович доктор технических наук профессор кафедры «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112 Тел.: +7(920) 478-04-91 E-mail: rodionow.u.w@rambler.ru</p>	<p>Rodionov Yuri Viktorovich D.Sc. in Technical Sciences professor at the department of «Mechanics and engineering graphics» Tambov State Technical University Phone: +7(920) 478-04-91 E-mail: rodionow.u.w@rambler.ru</p>

Рыбин Георгий Вячеславович студент кафедры «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112 Тел.: +7(475) 263-04-59 E-mail: enot1237@gmail.com	Rybin Georgy Vyacheslavovich student of the department «Operation of transport-technological machines and complexes» Tambov State Technical University Phone: +7(475) 263-04-59 E-mail: enot1237@gmail.com
Алексенцев Денис Сергеевич студент кафедры «Техника и технология производства нанопродуктов» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112 Тел.: +7(475) 263-04-59 E-mail: aleksentsevds@yandex.ru	Aleksentsev Denis Sergeevich student of the department «Technique and technology for the production of nanoproducts» Tambov State Technical University Phone: +7(475) 263-04-59 E-mail: aleksentsevds@yandex.ru