

Моделирование параметров процесса сушки банана

Кудряков Д.Н., Фролов Д.И.

Аннотация. Сушка фруктов необходима для снижения водной активности, предотвращения микробной порчи, снижения веса и затрат на упаковку, обработку и транспортировку. В статье изучается кинетика сушки тонкого слоя банана при температуре 40–60 °С. Математические модели сушки были подобраны к экспериментальным данным, полученным в ходе исследования. Миграция влаги из ломтиков банана была описана с использованием модели диффузии Фика, и был рассчитан эффективный коэффициент диффузии. Результат показал, что сушка происходила в основном в период падающей скорости с более высоким и более коротким временем сушки, достигаемым при более низкой и более высокой температуре печи соответственно. Эффективный коэффициент диффузии увеличивался с ростом температуры печи.

Ключевые слова: сушка, банан, кинетика сушки, модели сушки, эффективный коэффициент диффузии влаги.

Для цитирования: Кудряков Д.Н., Фролов Д.И. Моделирование параметров процесса сушки банана // Инновационная техника и технология. 2025. Т. 12. № 1. С. 17–22.

Modeling of banana drying process parameters

Kudryakov D.N., Frolov D.I.

Abstract. Fruit drying is necessary to reduce water activity, prevent microbial spoilage, reduce weight and save costs for packaging, handling and transportation. This paper studies the kinetics of banana thin layer drying at 40–60 °C. Mathematical drying models were fitted to the experimental data obtained during the study. Moisture migration from banana slices was described using the Fickian diffusion model and the effective diffusion coefficient was calculated. The result showed that drying occurred mainly during the period of decreasing velocity with higher and shorter drying times achieved at lower and higher oven temperatures, respectively. The effective diffusion coefficient increased with increasing oven temperature.

Keywords: drying, banana, drying kinetics, drying models, effective moisture diffusion coefficient.

For citation: Kudryakov D.N., Frolov D.I. Modeling of banana drying process parameters. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2025. Vol. 12. No. 1. pp. 17–22. (In Russ.).

Введение

Сушка представляет собой удаление влаги из пищевого материала с целью снижения микробной активности, порчи продукта и продления срока хранения. Знание кинетики сушки фруктов крайне важно для контроля и оптимизации процесса сушки, любого последующего или дальнейшего процесса и качества конечного продукта. В последнее время возросло внимание исследователей к сушке фруктов, в том числе к банану, что обусловлено его пищевой и экономической ценностью. Исследователи уже многократно исследовали некоторые характеристики сушки бананов в различных формах включая целые плоды [3], ломтики [5] и куски [6].

Характеристики сушки в тонком слое большинства сельскохозяйственных продуктов, включая бананы, можно описать с помощью моделей сушки. Эти модели сушки делятся на две основные группы: эмпирические и диффузионные модели [3]. По мнению авторов [1], диффузионные модели в отличие от эмпирических моделей включают коэффициент диффузии, который отражает возможное физическое явление, которое может возникнуть во время сушки. Диффузию часто описывают как один из механизмов переноса влаги во время сушки, но основа использования модели диффузии для подгонки сушки фруктов не была полностью обоснована, хотя описания и сравнения различных концепций диффузии и их приложений доступны.

Общее мировое производство бананов оценивается в более чем 19 101 тонн (по данным ФАО, 2024). Более 85% производства, состоит из бананов, выращиваемых фермерами или мелкими землевладельцами для домашнего использования или продажи на местном рынке.

Как и в случае с большинством фруктов, высокое содержание влаги в бананах делает их быстро портящимися в течение нескольких дней при температуре окружающей среды 20–25 °С, поэтому целью настоящего исследования было смоделировать кинетику сушки тонкого слоя банана в печи.

Объекты и методы исследований

Бананы были закуплены в магазине, в состоянии зрелости, пригодном для сушки (максимальное содержание сахарозы и полностью желтая кожура с небольшими коричневатыми пятнышками). Бананы были вымыты, очищены и нарезаны вручную на ломтики толщиной 5 мм. Нарезанные части были обработаны 4% раствором лимонной кислоты в течение 10 минут. Начальное содержание влаги было определено с использованием метода ГОСТ 28561-90 и было обнаружено, что оно составляет 78,73% (влажная основа).

Нарезанные ломтики бананов, обработанные лимонной кислотой, равномерно распределяли на подносе внутри печи с принудительной циркуляцией воздуха и высушивали при трех различных температурах, а именно 40°C, 50°C и 60°C. В процессе сушки образцы вынимали из печи через равные промежутки времени и взвешивали с помощью цифровых весов с точностью 0,01 г до достижения постоянного веса. Было проведено три различных испытания сушки при каждой температуре, и были получены средние значения в ходе этих испытаний.

Данные, полученные в результате экспериментальной сушки бананов при различных температурах, были подобраны с помощью шести математических выражений тонкослойной сушки, предложенных несколькими авторами.

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (1)$$

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt) \quad (2)$$

$$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) \quad (3)$$

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat) \quad (4)$$

$$MR = \exp(-kt^\theta n - I) \quad (5)$$

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (6)$$

где MR - содержание влаги в материале в момент времени t;

a – коэффициент, представляющий начальное содержание влаги или веса для первой экспоненты;

b – коэффициент для второй экспоненты;

k – константа скорости сушки для первой фазы;

g – константа скорости сушки для второй фазы;

t – время;

e – основание натурального логарифма;

θ – температура воздуха или другого окружающего материала;

n – коэффициент, описывающий влияние температуры на процесс сушки;

I – константа, учитывающая другие факторы, влияющие на содержание влаги;

c – конечное (равновесное) содержание влаги в материале.

Подгонка кривой была выполнена с использованием программного обеспечения Statistica 10. Коэффициент влажности (MR) образца был определен с использованием уравнения.

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (7)$$

где M – содержание влаги в продукте в каждый момент времени,

M_0 – начальное содержание влаги в продукте перед началом операции сушки.

Для выбора наилучшего уравнения/модели сушки, выражающей кривые сушки образцов, а также для определения согласованности полученных результатов использовались соответствующие статистические параметры.

Коэффициент детерминации (R^2) использовался для выбора наилучшего уравнения, выражающего кривые высыхания образца. В дополнение к коэффициенту детерминации, такие параметры, как приведенное значение хи-квадрат (χ^2), среднеквадратическая ошибка (RMSE), средняя ошибка смещения (MBE) использовались для определения согласованности подгонки. Наивысшие значения R^2 и наименьшие значения χ^2 , RMSE, MBE использовались в качестве основы для определения наилучшей подгонки. Статистические параметры χ^2 (приведенное значение хи-квадрат), RMSE (среднеквадратическая ошибка), MBE (средняя ошибка смещения) рассчитывались с использованием уравнений 8-10.

$$\chi^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{(N - n)} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i}) \quad (10)$$

Таблица 1 – Результаты значений констант, полученные из моделей, примененных к кривым сушки

Модель	T, °C	Константы			
(1)	40	a = - 0,0165	b = 7,86e- 007		
	50	a = - 0,0017	b = 9,13e- 007		
	60	a = - 0,0016	b = 8,19e- 007		
(2)	40	a = 0,8476	k = - 0,7668	g = 0,7376	
	50	a = 0,84619	k = 0,7269	g = 0,5600	
	60	a = 0,6439	k = 0,3597	g = 0,4413	
(3)	40	a = 1,041	k = - 0,002099	b = 0,000406	g = 0,00415
	50	a = 1,264	k = - 0,002534	b = - 0,2643	g = - 0,1569
	60	a = - 1,154	k = - 0,002352	b = - 0,1535	g = - 0,101
(4)	40	k = 1,028	n = - 0,001967		
	50	k = 1,044	n = - 0,00208		
	60	k = 1,027	n = - 0,002075		
(5)	40	a = 0,6743	k = 0,205	c = 0,3257	
	50	a = 0,6483	k = 0,205	c = 0,3517	
	60	a = 0,6483	k = 0,386	c = - 0,6216	
(6)	40	a = 0,0479	k = 0,8471		
	50	a = 0,7179	k = 0,9444		
	60	a = 0,3441	k = 0,3392		

где $MR_{exp,i}$ – экспериментальные данные о содержании влаги;

$MR_{pre,i}$ – предсказанные данные о содержании влаги;

N – общее количество наблюдений;

n – количество параметров модели;

i – индекс, который перебирает все наблюдения от 1 до N .

Решение второго закона диффузии Фика использовалось для вычисления эффективного коэффициента диффузии влаги. Уравнения 11–13 суммируют решение второго закона диффузии Фика.

Уравнение (11) основано на предположении, что коэффициент диффузии влаги постоянен, при этом ломтики банана представляют собой бесконечную геометрию пластины, а начальное распределение влаги равномерно. Уравнение (11) можно упростить до уравнения прямой линии (12). График экспериментальных данных сушки в $\ln(MR)$ против времени дает прямую линию с отрицательным наклоном φ .

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{4L^2} D_{eff} t\right) \right) D_{eff} t \quad (11)$$

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t\right) \quad (12)$$

$$\varphi = \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} \quad (13)$$

где MR – это коэффициент влажности;

D_{eff} – эффективный коэффициент диффузии влаги, m^2/c ;

L (m) – полутолщина ломтиков банана;

φ – наклон;

k, n, a, b, g, c – константы модели;

T – температура печи, °C;

t – время, мин.

Результаты и их обсуждение

Кривая сушки в процессе сушки в печи показана на рисунке 1, и она показывает, что в процессе сушки в процессе сушки в печи нет периода постоянной скорости сушки, поэтому вся сушка происходила в период падающей скорости. Это показывает, что диффузия является доминирующим физическим механизмом, управляющим движением влаги. Аналогичные результаты были получены для плодов банана [3]. Результат показывает, что повышение температуры сушки привело к увеличению скорости сушки, а значит, и к сокращению времени сушки. Это связано с тем, что сушка при более высокой температуре подразумевает большую движущую силу для теплопередачи. Более высокие температуры сушки обеспечили больший дефицит давления водяного пара или разницу между давлением насыщенного водяного пара и парциальным давлением водяного пара в воздухе при данной температуре, что является одной из движущих сил сушки. Время сушки, необходимое для снижения

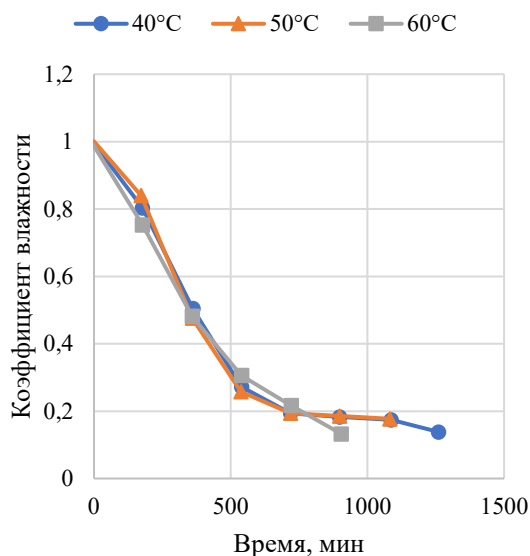


Рис. 1. Кривые сушки бананов при различных температурах в печи

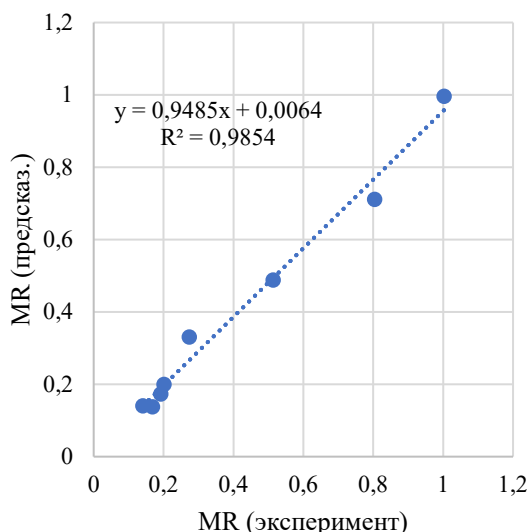


Рис. 2. Сравнение экспериментального и прогнозируемого соотношения влажности по двухчленной модели при температуре печи 40°C

исходного содержания влаги до любого заданного уровня, зависело от условий сушки, будучи самым высоким при 40°C и самым низким при 60°C. Время, необходимое для снижения содержания влаги с начального значения 78,73% (вл.с.) до конечного значения 11,05, 13,01 и 12,05% (вл.с.), составило 1260, 1080 и 900 минут при 40, 50 и 60°C.

Оцененные константы для выбранных моделей представлены в таблице 1. Средние значения статистических параметров учитывались при выборе наилучшей модели для описания поведения сушки. Двухчленная модель (3) была выбрана как наиболее подходящая модель, представляющая тонкослойную сушку банана, на основе критериев самого высокого R^2 и самого низкого χ^2 , RMSE. Можно видеть, что среднее значение (R^2) оказалось самым

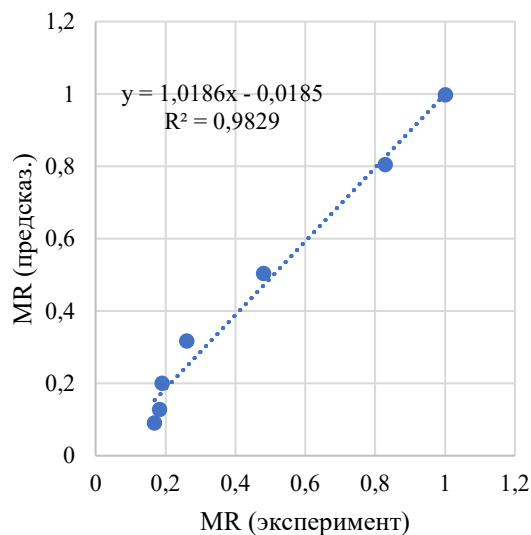


Рис. 3. Сравнение экспериментального и прогнозируемого соотношения влажности по двухчленной модели при температуре печи 50°C

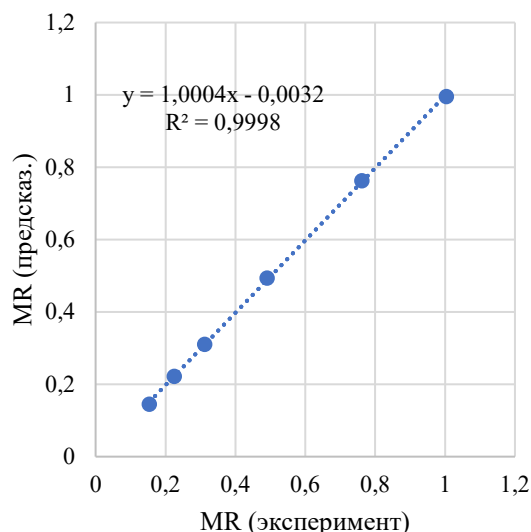


Рис. 4. Сравнение экспериментального и прогнозируемого соотношения влажности по двухчленной модели при температуре печи 60°C

высоким, а значения χ^2 , RMSE были самыми низкими по сравнению с другими моделями.

Проверка прогнозируемых значений соотношения влажности, полученных с помощью двухчленной модели (3) для описания кинетики сушки, проводилась путем сравнения экспериментальных данных соотношения влажности с прогнозируемыми с помощью модели при 40, 50 и 60°C, как показано на рисунках 2, 3 и 4.

Относительно высокие значения коэффициента корреляции для полученных прямых линий являются показателем хорошего соответствия между прогнозируемыми и экспериментальными значениями соотношения влажности. Более того, данные, полученные для модели (3), могут быть применены на практике для оптимизации процесса сушки, проектирования эффективного сушильного оборудо-

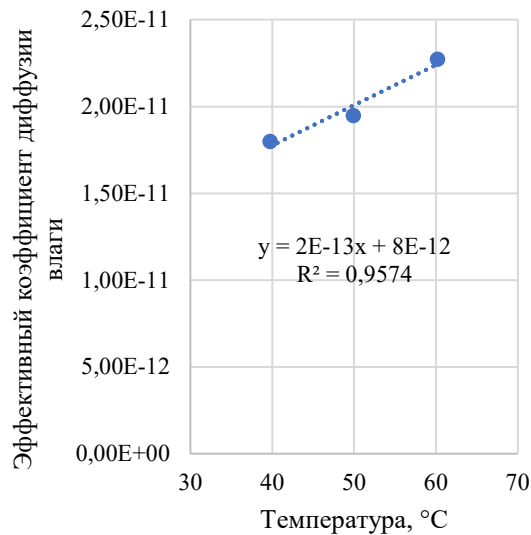


Рис. 5. Влияние температуры печи на эффективную диффузию влаги у бананов

вания и описания передачи тепла во время сушки банана.

Определенные значения коэффициента диффузии влаги для банана при различных температурах печи приведены на рисунке 5. Эффективные коэффициенты диффузии составили $1,80 \times 10^{-11}$, $1,95 \times 10^{-11}$ и $2,28 \times 10^{-11}$ м²/с при 40, 50 и 60 °C соответственно. Эти значения соответствуют общему диапазону от 10^{-12} м²/с до 10^{-8} м²/с для пищевых материалов.

Литература

- [1] Aguerre R. J., Suarez C. Diffusion of bound water in starchy materials: application to drying // *Journal of food engineering*. – 2004. – Т. 64. – №. 3. – С. 389-395.
- [2] Çağlar A., Toğrul İ. T., Toğrul H. Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying // *Food and Bioproducts Processing*. – 2009. – Т. 87. – №. 4. – С. 292-300.
- [3] Da Silva W. P. et al. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas // *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. – 2014. – Т. 13. – №. 1. – С. 67-74.
- [4] Doymaz İ., İsmail O. Drying characteristics of sweet cherry // *Food and bioproducts processing*. – 2011. – Т. 89. – №. 1. – С. 31-38.
- [5] Ganesapillai M., Regupathi I., Murugesan T. Modeling of thin layer drying of banana (Nendran Spp) under microwave, convective and combined microwave-convective processes // *Chemical Product and Process Modeling*. – 2011. – Т. 6. – №. 1.
- [6] Garcia R., Leal F., Rolz C. Drying of bananas using microwave and air ovens // *International Journal of Food Science and Technology*. – 1988. – Т. 23. – №. 1. – С. 73-80.
- [7] Алтухов И. В., Очиров В. Д. Анализ способов сушки пищевых продуктов // *Вестник ИрГЦХА*. – 2009. – №. 36. – С. 16-21.

Эффективный коэффициент диффузии влаги – это термин, используемый для описания миграции или диффузии влаги в пищевых продуктах во время операции сушки, и считается, что он является функцией содержания влаги в материале и температуры, а также структуры материала. Из рисунка 5 очевидно, что значения коэффициентов диффузии влаги увеличиваются с повышением температуры печи. Аналогичные наблюдения были сделаны авторами для винограда без косточек и черешни [4, 2].

Выводы

Результаты, полученные для кинетики сушки в печи банана, показывают, что увеличение температуры в печи с 40 до 60 °C уменьшило время сушки с 1260 до 900 минут, причем вся операция сушки происходила в период падающей скорости, и не наблюдалось периода постоянной скорости. Среди протестированных моделей двухчленная модель (3) была признана подходящей для описания кинетики сушки. Диффузия влаги увеличивалась с ростом температуры в печи со значениями в диапазоне $1,80 \times 10^{-11}$ – $2,28 \times 10^{-11}$ м²/с при 40-60 °C соответственно. Результаты, полученные в этом исследовании, могут быть применены на практике для оптимизации процесса сушки, проектирования эффективного сушильного оборудования и описания передачи тепла во время сушки банана.

References

- [1] Aguerre R. J., Suarez C. Diffusion of bound water in starchy materials: application to drying // *Journal of food engineering*. – 2004. – Т. 64. – No. 3. – pp. 389-395.
- [2] Çağlar A., Toğrul İ. T., Toğrul H. Moisture and thermal diffusivity of seedless grapes under infrared drying // *Food and Bioproducts Processing*. – 2009. – Т. 87. – No. 4. – pp. 292-300.
- [3] Da Silva W. P. et al. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas // *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. – 2014. – Т. 13. – No. 1. – pp. 67-74.
- [4] Doymaz İ., İsmail O. Drying characteristics of sweet cherry // *Food and bioproducts processing*. – 2011. – Т. 89. – No. 1. – pp. 31-38.
- [5] Ganesapillai M., Regupathi I., Murugesan T. Modeling of thin layer drying of banana (Nendran Spp) under microwave, convective and combined microwave-convective processes // *Chemical Product and Process Modeling*. – 2011. – Т. 6. – No. 1.
- [6] Garcia R., Leal F., Rolz C. Drying of bananas using microwave and air ovens // *International Journal of Food Science and Technology*. – 1988. – Т. 23. – No. 1. – pp. 73-80.
- [7] Altukhov I. V., Ochirov V. D. Analysis of food drying

- [8] Бурак Л. Ч. Существующие способы обработки пищевых продуктов и их влияние на пищевую ценность и химический состав // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК–продукты здорового питания. – 2021. – №. 3. – С. 59-73.
- [9] ГОСТ 28561-90. Качество воздуха. Определение общего содержания углерода (ОВУ). Метод высокотемпературного сжигания. — М.: Издательство стандартов, 1990. — 8 с.
- [10] Харьков В. В., Николаев А. Н. Выбор модели кинетики сушки дисперсных материалов для вычислительного эксперимента // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – №. 9. – С. 7-11.
- [11] Холманский А. С., Тилов А. З., Сорокина Е. Ю. Физико-химическое моделирование процесса сушки овощей и фруктов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №. 5. – С. 83-83.
- [12] Юсупов М. Т., Абдуллаева Н. Х. Моделирование распределения температуры в процессе сушки винограда // Механика и технология. – 2022. – №. Спецвыпуск 1. – С. 163-167.
- methods // Bulletin of IrGSKhA. - 2009. - No. 36. - P. 16-21.
- [8] Burak L. Ch. Existing methods of food processing and their impact on nutritional value and chemical composition // Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex - healthy food products. - 2021. - No. 3. - P. 59-73.
- [9] GOST 28561-90. Air quality. Determination of total carbon content (TCC). High-temperature combustion method. - M.: Publishing house of standards, 1990. - 8 p.
- [10] Kharkov V. V., Nikolaev A. N. Selection of a model for the kinetics of drying of dispersed materials for a computational experiment // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. – 2018. – No. 9. – P. 7-11.
- [11] Kholmansky A. S., Tilov A. Z., Sorokina E. Yu. Physicochemical modeling of the drying process of vegetables and fruits // Modern problems of science and education. – 2012. – No. 5. – P. 83-83.
- [12] Yusupov M. T., Abdullaeva N. Kh. Modeling of temperature distribution in the process of drying grapes // Mechanics and technology. – 2022. – No. Special issue 1. – P. 163-167.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Кудряков Дамир Наилевич магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11</p>	<p>Kudryakov Damir Nailevich undergraduate of the department «Food productions» Penza State Technological University</p>
<p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>