

На правах рукописи

**СТОЛЯРОВ Иван Николаевич**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ОБЖАРКИ КАШТАНОВ И ОРЕХА ФУНДУК  
ПЕРЕГРЕТЫМ ПАРОМ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых  
производств»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Воронеж – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»).

Научный руководитель – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор

**Остриков Александр Николаевич**

(ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»)

Официальные оппоненты – **Плаксин Юрий Михайлович**

доктор технических наук, профессор,  
ЧОУ ВО «Московский институт энергобезопасности и энергосбережения», профессор кафедры промышленной и коммунальной энергетики;

**Воронова Елена Васильевна**

кандидат технических наук,  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», доцент кафедры функционального анализа и операторных уравнений

**Ведущая организация** – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (г. Воронеж)

Защита диссертации состоится «09» июня 2016 г. в 11<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета университета. Автореферат размещен на сайтах Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <https://vak3.ed.gov.ru> и ВГУИТ <http://www.vsuet.ru> «8» апреля 2016 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» [www.vsuet.ru](http://www.vsuet.ru) «21» марта 2016 г.

Автореферат разослан «22» апреля 2016 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций  
на соискание ученой степени кандидата наук,  
на соискание ученой степени доктора наук  
Д 212.035.01, доцент

 **Л.Н. Фролова**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Все более востребованными становятся продукты питания, которые не только обладают высокой энергетической ценностью, но и содержат необходимое количество витаминов и аминокислот. При этом покупатели отдадут предпочтение продуктам природного происхождения. Пищевые добавки природного происхождения при систематическом употреблении обеспечивают организм энергией и регулируют физиологические функции. В большинстве случаев пищевые добавки вносятся для улучшения органолептических свойств продуктов питания.

Потребность в пищевых добавках особенно возросла в последнее время в связи с увеличением спроса на более питательные пищевые продукты.

Средний показатель объема рынка пищевых добавок по анализу РБК составил \$2,1 млрд. на момент 2014 года при темпах роста в 5 %. Общие продажи пищевых добавок в мире оцениваются более чем в 20 млрд. долл. США в год.

С целью увеличения сроков хранения орехов фундук и каштанов, придания им специфического вкуса и запаха и уменьшения количества дубильных веществ в них, а также предотвращения прогоркания жиров, которые содержатся в орехах в значительных количествах, сырье необходимо подвергать термической обработке.

**Цель диссертационной работы:** научное обеспечение процесса обжарки каштанов и ореха фундук перегретым паром на основе комплексного анализа основных закономерностей процесса обжарки совместно с теплофизическими и структурно-механическими характеристиками исследуемого сырья; разработка комбинированных режимов обжарки и проведение инженерных расчетов с последующим обоснованием выбора перспективной конструкции обжарочного аппарата, обеспечивающего экономию теплоэнергетических ресурсов.

В соответствии с целью решались **следующие задачи:**

1. Изучение каштанов и орехов фундук как объектов исследования; систематизация полученных данных и формулировка на

их основе рабочих гипотез по использованию их в производстве пищевых добавок.

2. Изучение процесса термического разложения исследуемых видов растительного сырья, выявление температурных зон испарения влаги различных форм связи.

3. Изучение гидродинамических и кинетических закономерностей процесса обжарки каштанов и орехов фундук перегретым паром.

4. Определение рациональных технологических параметров процесса обжарки каштанов и орехов фундук перегретым паром атмосферного давления.

5. Разработка математической модели обжарки каштанов и орехов фундук перегретым паром.

6. Проведение инженерных расчетов с целью определения оптимальных параметров обжарочного оборудования.

7. Разработка конструкции обжарочного аппарата и способа обжарки растительного сырья.

Работа проводилась в соответствии с планом государственной НИР кафедры технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств «Разработка и совершенствование энергосберегающих технологических процессов и аппаратов в химических и пищевых производствах» и государственного задания № 2014/22 (проект № 1964) на тему «Разработка энергосберегающих процессов сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов при программированном теплоподводе».

**Научная новизна.** Методом термического анализа установлены формы связи влаги с материалом и выявлены температурные зоны, соответствующие испарению влаги с различной формой связи и термическому разложению белково-углеводного комплекса. Изучены гидродинамические и кинетические закономерности процесса обжарки в плотном слое каштанов и орехов фундук. Обоснована целесообразность использования ступенчатых режимов теплоподвода для обжарки каштанов и орехов фундук в соответствии с формой связи удаляемой влаги.

Разработана математическая модель процесса обжарки каштанов и орехов фундук перегретым паром, позволяющая рассчитать температуру и влагосодержание продукта.

Новизна технических решений подтверждена патентами РФ № 2466564, 2520752.

Продана лицензия на патент РФ № 2520752 ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности».

**Практическая ценность.** Определены и обоснованы рациональные технологические режимы процесса обжарки каштанов и орехов фундук перегретым паром атмосферного давления.

Разработана методика инженерного расчета предлагаемой перспективной конструкции установки для реализации процесса обжарки каштанов и орехов фундук при сбалансированных материальных и энергетических потоках в замкнутых термодинамических циклах по отработанному перегретому пару.

Разработана технология получения обжаренной пищевой добавки. Определена пищевая, биологическая и энергетическая ценность полученных пищевых добавок.

Выполнен экономический расчет, свидетельствующий о преимуществах предлагаемой технологии.

Выполнен эксергетический анализ процесса обжарки каштанов и орехов фундук перегретым паром, свидетельствующий о термодинамическом совершенстве предлагаемых способов производства обжаренных продуктов.

Разработаны и утверждены технические условия ТУ 9293-001-02068108-16 «Обжаренные полуфабрикаты из растительного сырья» и технологические инструкции к ним. Соответствие образцов продукта требованиям ТУ подтверждено актом дегустации обжаренных полуфабрикатов из растительного сырья.

**Апробация работы.** Материалы и отдельные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на международных, всероссийских, научных, научно-технических и научно-практических конференциях и симпозиумах: (Ставрополь, 2010, 2011), (Воронеж, 2009, 2011, 2012, 2013), (Румыния, 2011); отчетных научных конференциях ВГУ-ИТ за 2009-2016 гг.

Результаты работы демонстрировались на выставках и были награждены грамотой за активное участие в VII Междуна-

родной научно-практической конференции «Место и роль России в мировом хозяйстве» (Воронеж, 2012) и дипломом победителя конкурса «Инженерные технологии XXI века» (Воронеж, 2013).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, получено 2 патента РФ и 2 свидетельства Роспатента о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 22 таблицы. Список литературы включает 94 наименования, в том числе 17 на иностранных языках. Приложения к диссертации представлены на 65 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** охарактеризовано современное состояние производства пищевых добавок; обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе** систематизированы литературные данные о современном состоянии теории, техники и технологии получения обжаренных пищевых добавок, об основных направлениях совершенствования обжарочного оборудования и технологии обжарки. На основании проведенного анализа обоснован выбор объекта исследования, сформулированы задачи диссертационной работы и определены методы их решения.

**Во второй главе** исследовано растительное сырье: орехи фундук и каштаны как объекты исследований. Получены зависимости коэффициентов внешнего и внутреннего трения по стали от влажности растительного сырья. Их анализ показывает, что коэффициенты внешнего и внутреннего трения увеличиваются с ростом влажности.

Для орехов фундук:

$$f_{\text{внешн}} = 0,0011 \cdot W + 0,5614, \quad f_{\text{внутр}} = 0,0013 \cdot W + 0,4497 \cdot (1)$$

Для каштанов:

$$f_{\text{внешн}} = 0,0017 \cdot W + 0,41, \quad f_{\text{внутр}} = 0,0015 \cdot W + 0,3799 \cdot \quad (2)$$

Для выявления закономерностей теплового воздействия на растительное сырье был проведен термический анализ орехов фундук и каштанов на термоанализаторе TGA-DSC фирмы Mettler-Toledo. С целью анализа процесса удаления влаги из орехов фундук и каштанов была использована зависимость изменения массы в координатах « $-\lg \alpha - (10^3/T)$ ». В результате анализа которой выделены четыре линейных участка для каждого из видов растительного сырья, что говорит о ступенчатом испарении влаги: 1 – физико-механически связанная влага; 2 – осмотическая влага; 3 – полиадсорбционная влага; 4 – моноадсорбционная влага (рисунок 1).

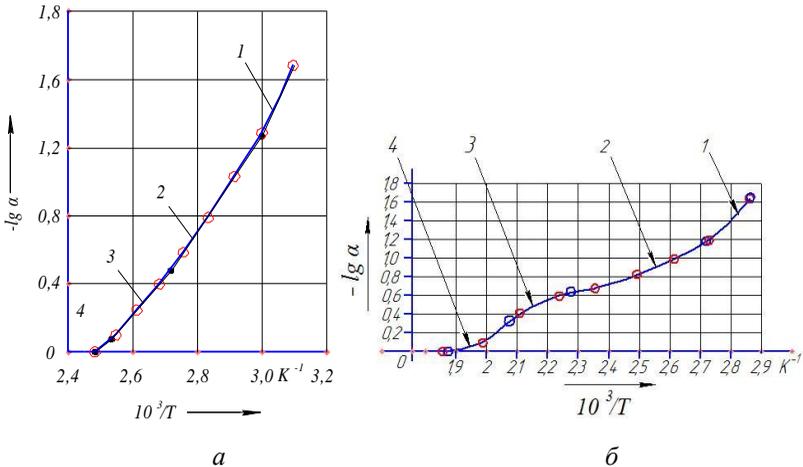


Рисунок 1 – Зависимость  $-\lg \alpha$  от величины  $10^3/T$  исследуемого растительного сырья (а – каштанов; б – орехов фундук) при нагревании со скоростью подъема температуры 3 К/мин

Для определения теплофизических характеристик растительного сырья использован метод нестационарного теплового режима. Статистическая обработка опытных данных на ЭВМ в среде программы Microsoft Excel 2013 позволила получить уравнения, описывающие теплофизические свойства растительного

сырья для интервала температур (293...353 К) (таблица 1).

Т а б л и ц а 1 – Зависимость теплофизических свойств каштанов и орехов фундук от температуры  $t$ , °С

Растительное сырье	Теплофизические свойства		
	Удельная теплоемкость $c$ , Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Коэффициент температуропроводности $a$ , м <sup>2</sup> /с
Орехи фундук свежие $W = 39,81$ %	$697,3 + 1,3749t$	$0,1373 + 0,0002t$	$(2,969 + 0,0034t) \cdot 10^{-8}$
Орехи фундук обжаренные $W = 5$ %	$2148,4 + 1,6642t$	$0,0734 + 0,0001t$	$(2,75 + 0,003t) \cdot 10^{-8}$
Каштаны свежие $W = 43,38$ %	$3062,6 + 1,5583t$	$0,137 + 0,0002t$	$(4,08 + 0,0037t) \cdot 10^{-8}$
Каштаны обжаренные $W = 3,98$ %	$1839,9 + 2,211t$	$0,084 + 0,0002t$	$(3,9 + 0,0036t) \cdot 10^{-8}$

Зависимости коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости от температуры носят линейный характер. Влажность оказывает большее влияние на исследуемые коэффициенты, чем температура.

Дано описание экспериментальной установки, на которой проводились исследования процесса обжарки растительного сырья. В качестве объекта исследования использовали орехи фундук и каштаны, которые подвергались очистке от примесей и нарезались на кубики с размером 3...5 мм. Исследование процесса обжарки орехов фундук проводилось при 130...160 °С, каштанов – при 150...180 °С и скоростях теплоносителя 0,35...2,0 м/с. Начальная влажность продукта составляла 45-50 %. В процессе обжарки влажность продукта снижалась до 3-5 %. Продолжительность обжарки составляла 24-52 мин, а удельная нагрузка продукта на решетку –  $9,8 \pm 0,2$  кг/м<sup>2</sup>. В качестве тепло-

носителя был выбран перегретый пар атмосферного давления.

Изучена гидродинамика процесса на примере обжарки ореха фундук. Анализ изменения гидравлического сопротивления слоя орехов в процессе обжарки при температурах перегретого пара в интервале 403...433 К и скоростях в интервале 0,8...2 м/с указывает на экспоненциальное уменьшение  $\Delta P$  в начале процесса обжарки, обусловленное снижением влажности продукта (рисунок 2). В дальнейшем гидравлическое сопротивление слоя обжариваемых орехов фундук практически не менялось. Это объясняется незначительным изменением влажности частиц орехов.

Изменение  $\Delta P$  связано с изменением влагосодержания, порозности слоя и усадки частиц продукта. Выяснено, что коэффициент гидравлического сопротивления слоя частиц продукта  $\lambda$  зависит, по большей части, от скорости перегретого пара (рисунок 2). По результатам обработки экспериментальных данных была определена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления, как функция  $\lambda = f(\text{Re})$ :

$$\lambda = 1,05 / \text{Re}^{0,137}. \quad (3)$$

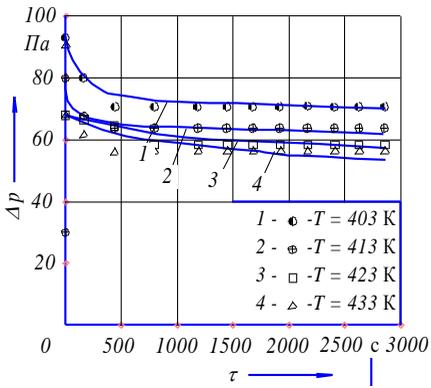
Получены эмпирические уравнения, выражающие зависимость величины усадки  $\delta$  от текущего влагосодержания исследуемых видов растительного сырья:

$$\delta = A \ln u + B, \quad (4)$$

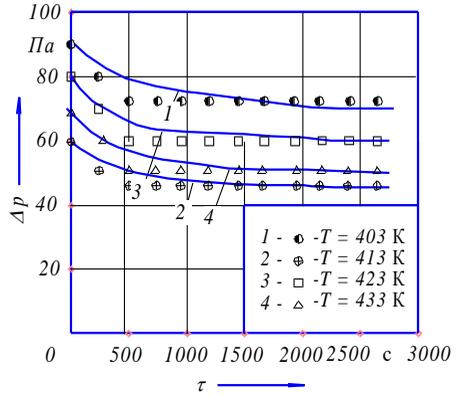
где для орехов фундук  $A = -0,201$ ;  $B = -0,0453$ ; для каштанов  $A = -0,178$ ;  $B = 0,0681$ .

Получены зависимости высоты слоя от времени, коэффициента объемной усадки от времени и влагосодержания для всех исследуемых продуктов.

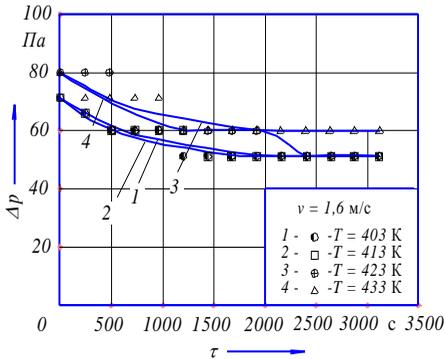
Рассмотрены основные кинетические закономерности процесса обжарки орехов фундук. Анализ кривых обжарки (рисунок 3) и скорости обжарки (рисунок 4), термограмм (рисунок 5) и температурных кривых (рисунок 6) орехов фундук перегретым паром указывает на то, что обжарка преимущественно идет в периоде убывающей скорости.



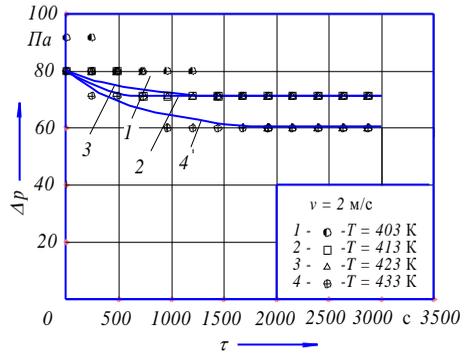
а



б



в



з

Рисунок 2 – Зависимость гидравлического сопротивления слоя частиц орехов фундук от времени при различных скоростях перегретого пара,  $v$ , м/с: а – 0,8; б – 1,2; в – 1,6; з – 2

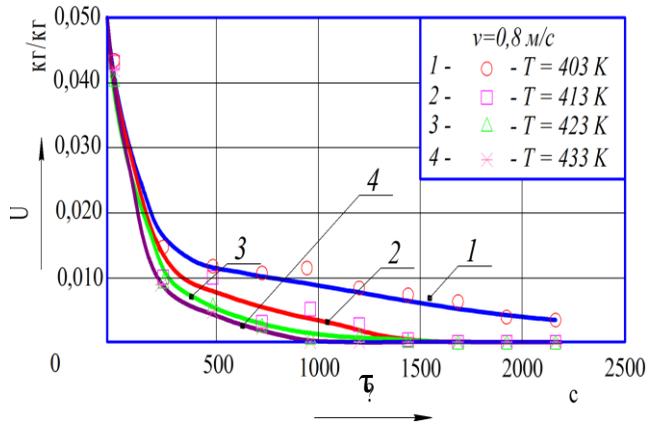


Рисунок 3 – Кривые обжарки орехов фундук при температуре теплоносителя  $T$ , К: 1 – 403; 2 – 413; 3 – 423; 4 – 433

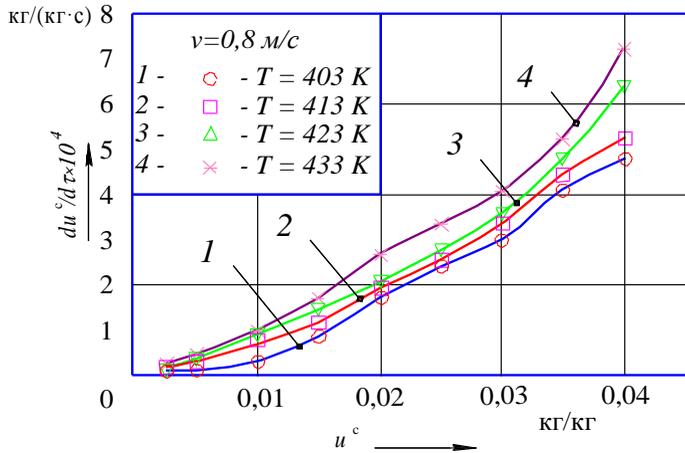


Рисунок 4 – Кривые скорости обжарки орехов фундук при температуре теплоносителя  $T$ , К: 1 – 403; 2 – 413; 3 – 423; 4 – 433

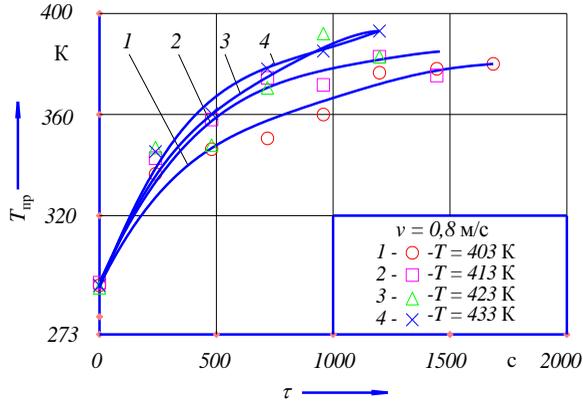


Рисунок 5– Термограммы обжарки орехов фундук при температуре теплоносителя  $T$ , К: 1 – 403; 2 – 413; 3 – 423; 4 – 433

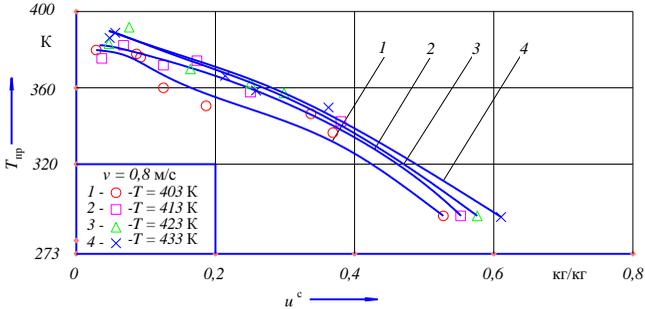


Рисунок 6 – Температурные кривые обжарки орехов фундук при температуре теплоносителя  $T$ , К: 1 – 423; 2 – 433; 3 – 443; 4 – 463

Построенные кинетические закономерности, полученные при стационарных температурно-скоростных режимах, позволили определить интенсивность процесса обжарки в различные ее периоды.

С учетом полученных данных и результатов термического анализа сырья были разработаны ступенчатые режимы обжарки (таблица 2).

Т а б л и ц а 2 – Ступенчатые режимы обжарки растительного сырья

Параметры	Этапы		
	I	II	III
<i>Орехи фундук</i>			
Температура теплоносителя, К	403	413	423
Скорость теплоносителя, м/с	2	1,6	1,2
Продолжительность, с	720	360	540
<i>Каштаны</i>			
Температура теплоносителя, К	423	433	443
Скорость теплоносителя, м/с	1,85	1,3	0,8
Продолжительность, с	720	300	660

В основу ступенчатых режимов был заложен принцип повышения температуры и снижения скорости теплоносителя по ходу процесса. Он обусловлен тем, что в начале обжарки из продукта активно удаляется физико-механически связанная влага, которую необходимо отводить, а в конце – физико-химическая (осмотическая и адсорбционная), для удаления которой требуется подвод значительного количества теплоты.

**В третьей главе** приведено математическое описание процесса обжарки орехов фундук при следующих допущениях: частицы орехов рассматриваются в виде куба; геометрическая форма обжариваемого продукта постоянна; начальное распределение температуры и влагосодержания по объему обжариваемого продукта постоянны; плотность потока теплоты и массы постоянны; разбиение на зоны позволяет достигать требуемой точности расчета температуры и влажности продукта.

Процесс обжарки представлен системой дифференциальных уравнений теплопереноса:

$$\frac{du}{d\tau} = a_m \nabla^2 u + a_m^T \nabla^2 T = a_m [\nabla^2 u + \delta \nabla^2 T] \quad (5)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \left( a + a_{m1} \frac{r_{12}}{c} \right) \nabla^2 T + a_{m1} \frac{r_{12}}{c} \nabla^2 u - \left[ (c_1 a_{m1} + c_2 a_{m2}) \nabla u + (c_1 a_{m1}^T + c_2 a_{m2}^T) \nabla T \right] \frac{\nabla T}{c} \quad (6)$$

с начальными условиями:

$$T(x, \tau) \Big|_{x=0} = 0,0021\tau^4 + 0,0764\tau^3 - 2,0187\tau^2 + 19,698\tau + 285,54,$$

$$u(x, \tau) \Big|_{x=0} = 9 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 0,0211\tau + 0,6924,$$

$$T(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_n,$$

$$u(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = u_n$$

и граничными условиями третьего рода:

для уравнения теплопроводности

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X(\tau)} = \alpha (T_{\text{пр}} - T_n);$$

для уравнения массопереноса

$$-a_m \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=X(\tau)} = \beta (T_{\text{пр}} - T_n).$$

Для определения изменения температуры и влагосодержания по ходу процесса и по слоям использован метод конечно-разностной схемы, реализованный через метод сетки. Разработан программный модуль расчета процесса обжарки орехов фундук перегретым паром в системе *Mathcad 15*.

По сравнительному анализу результатов аппроксимации расчетных и экспериментальных данных (рисунки 7 и 8) установлено, что их среднеквадратичное отклонение по абсолютному значению не превышало для температуры 3,5 % и для влагосодержания 8,9 %.

**В четвертой главе** приведены методики определения химического состава свежих и обжаренных продуктов: витаминов В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, РР, С, Е; содержания нитратов; аминокислот; минеральных веществ К, Са, Fe, Р, Mg, Na; белка; сахарозы и массовой доли влаги, а также сведены в таблицу стандарты, в соответствии с которыми выполнялись анализы.

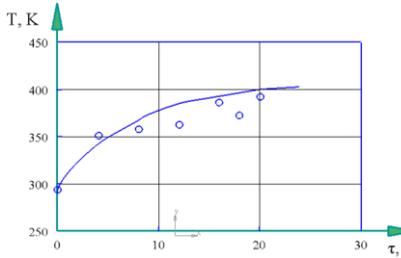


Рисунок 7 – Термограмма теплоемкости при обжарке орехов фундук: сравнение расчетных (—) и экспериментальных (○) данных при обжарке перегретым паром:  $T_{II} = 433 \text{ K}$ ;  $q_n = 9,6 \text{ кг/м}^2$ ;  $v = 1,6 \text{ м/с}$

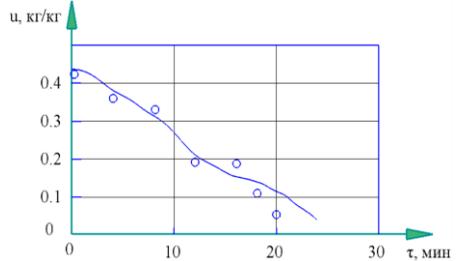


Рисунок 8 – Кривая обжарки орехов фундук: сравнение расчетных (—) и экспериментальных (○) данных при обжарке перегретым паром:  $T_{II} = 433 \text{ K}$ ;  $q_n = 9,6 \text{ кг/м}^2$ ;  $v = 1,6 \text{ м/с}$

Полученные данные свидетельствуют о соответствии допустимым нормам микробиологических показателей и содержания вредных для здоровья соединений: нитратов, пестицидов и тяжелых металлов; а также высокой степени сохранности ценных питательных веществ в процессе обжарки, что обусловлено подбором рациональных параметров термической обработки.

**В пятой главе** представлен тепловой расчет обжарочного аппарата для обжарки растительного сырья перегретым паром и его эксергетический анализ (рисунок 9).

Полученный эксергетический КПД равен 12,20 %, что на 7,62 % выше, чем при использовании технологии-прототипа, что говорит о повышении степени термодинамического совершенства системы.

Также предложена конструкция обжарочного аппарата (рисунок 10) и способ обжарки растительного сырья, проведен экономический расчет внедрения разработанного обжарочного аппарата в производственную линию (рисунок 11) по получению обжаренного растительного полуфабриката.

Рассчитанные экономические показатели свидетельствуют о целесообразности внедрения нового оборудования - замена сушиллки Г4-КСК-15 на роторную сушилку.

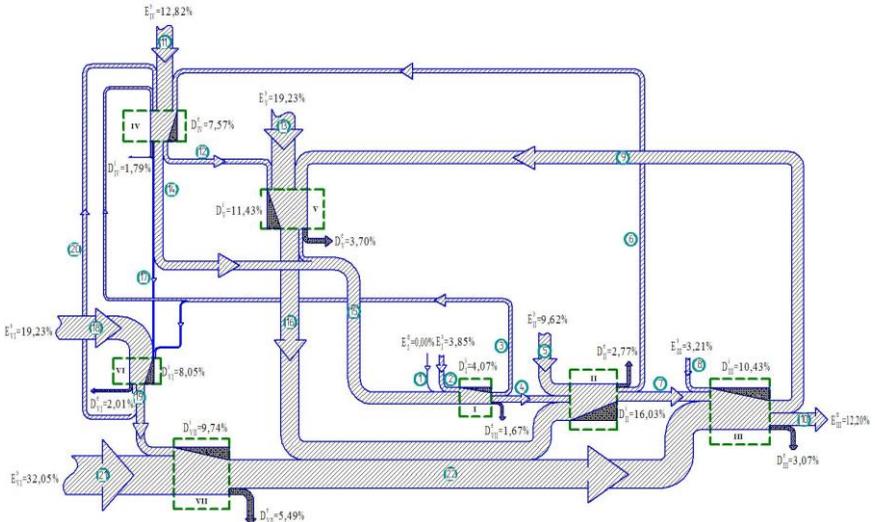


Рисунок 9 - Диаграмма Грассмана-Шаргута для исследуемой технологии:  
I-VII – номера контрольных поверхностей

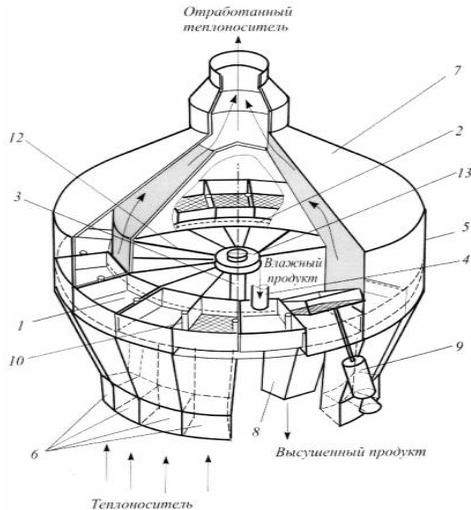


Рисунок 10 – Роторный обжарочный аппарат: 1 – трапециевидные формочки; 2 – направляющие; 3 – приводной вал; 4 – загрузочный бункер; 5 – рабочая камера; 6 – патрубки; 7 – вытяжной зонт; 8 – пневмоцилиндр; 9 – вертикальный штыри; 10 – крестовины; 12 – кольцеобразная втулка

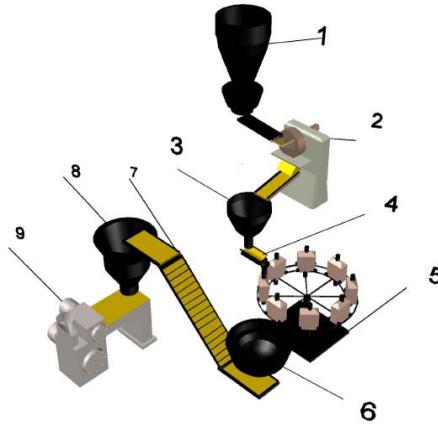


Рисунок 11 – Линия с внедренным обжарочным аппаратом:  
 1 – специализированный очиститель; 2 – резательная машина; 3 – накопительный бункер; 4 – весы; 5 – обжарочный аппарат; 6 – охлаждающая чаша; 7 – ленточный транспортер; 8 – магнитный сепаратор; 9 – дробилка

Экономическая эффективность составит 9,93 р. на рубль капитальных вложений, что позволит окупить затраты на модернизацию за один месяц.

### Условные обозначения

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $a_m^T$  – коэффициент термодиффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $D$  – потери эксергии,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $f_{\text{внутр}}$ ,  $f_{\text{внешн}}$  – коэффициенты внутреннего и внешнего трения;  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление,  $\text{Па}$ ;  $q$  – удельная нагрузка на газораспределительную решетку,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;  $r_{12}$  – удельная теплота парообразования,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $T$  – температура,  $\text{К}$ ;  $t$ ,  $\tau$  – время,  $\text{с}$ ;  $W$  – влажность,  $\%$ ;  $X$ ,  $x$  – координаты;  $u$  – влагосодержание,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $v$  – скорость,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\nabla$  – градиент;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ; степень превращения вещества;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\delta$  – относительная усадка;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; коэффициент гидравлического сопротивления;  $\text{Re}$  – критерий Рейнольдса.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Изучены орехи фундук и каштаны как объекты исследований; систематизированы полученные данные.

2. Определены теплофизические характеристики орехов фундук и каштанов для интервала температур 293...353 К методом нестационарного теплового режима. Выявлено, что с повышением температуры удельная теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности растительного сырья увеличиваются.

3. Проведен термический анализ орехов фундук и каштанов на комплексном термоанализаторе фирмы «Mettler-Toledo» и выявлены формы связи влаги в продукте.

4. Изучены кинетические и гидродинамические закономерности процесса обжарки растительного сырья перегретым паром при температуре теплоносителя 403...493 К и скорости 0,35...2 м/с. Выявлено, что процесс обжарки идет преимущественно в периоде убывающей скорости сушки. Разработаны ступенчатые режимы обжарки исследуемых видов растительного сырья, предусматривающие снижение скорости теплоносителя и повышение температуры теплоносителя в процессе обжарки.

5. Разработана математическая модель обжарки растительного сырья перегретым паром, позволяющая определить поля температуры и влагосодержания по высоте слоя обжариваемого продукта. Среднеквадратичная погрешность не превышала 9,0 %.

6. Определены физико-химические и органолептические характеристики полученного обжаренного продукта.

7. Проведены инженерные расчеты оборудования для предлагаемого процесса обжарки, разработана конструкция обжарочного аппарата и способ получения обжаренного растительного сырья.

8. Выполнен эксергетический анализ. Полученный эксергетический КПД равен 12,20 %, что на 7,62 % выше, чем при использовании технологии-прототипа, что говорит о повышении степени термодинамического совершенства системы.

9. Проведен тепловой и экономический расчет внедрения разработанного обжарочного аппарата. Экономическая эффективность составит 9,93 р. на рубль капитальных вложений, что позволит окупить затраты на модернизацию за один месяц.

**Основные положения диссертации опубликованы  
в следующих работах:**

**Патенты**

**1. Пат. 2520752 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 26 B 15/04.** Роторная сушилка / Остриков А.Н., Шевцов С.А., Столяров И.Н.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2013115610/06; заявлено 05.04.2013; опубл. 27.06.2014; Бюл. № 18 // Открытия. Изобретения. – 2014. – № 18.

**2. Пат. 2466564 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> A23 L, A23F 5/44.** Способ производства обжаренных каштанов / Остриков А.Н., Столяров И.Н.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2011123055/13; заявлено 07.06.2011; опубл. 20.11.2012; Бюл. № 32 // Открытия. Изобретения. – 2012. – № 32.

**Зарегистрированные программы для ЭВМ**

**1. Остриков А.Н., Шевцов С.А., Столяров И.Н.** Программа для расчета процесса сушки пищевого растительного сырья перегретым паром атмосферного давления при комбинированных гидродинамических режимах. РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2014614264; – № 2014611995; заявл. 11.03.2014; зарегистр. 21.04.2014.

**2. Остриков А.Н., Шевцов С.А., Столяров И.Н.** Программа для расчета сбалансированности тепловых и материальных потоков в технологии производства пищевых концентратов. РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2014614592; – № 2014611698; заявл. 03.03.2014; зарегистр. 29.04.2014.

## Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

**1. Остриков, А.Н.** Математическая модель процесса обжарки каштанов перегретым паром / А. Н. Остриков., И. Н. Столяров // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2013. – № 3. – С. 49-54.

**2. Остриков, А. Н.** Численно-аналитическое решение трехмерной модели нестационарного теплопереноса в процессе конвективной сушки пищевого растительного сырья / А.Н. Остриков., И.Н. Столяров// Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2014. – № 2-3. – С. 116-120.

**3. Столяров, И.Н.** Совершенствование процесса обжарки каштанов и разработка способа получения белоксодержащей пищевой добавки на их основе / И.Н. Столяров // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2014. – № 2-3. – С. 116-120.

## Статьи

**1. Ostrikov, A. N.** Kinetic Regularities Of Hazelnut Roasting Process Using Superheated Steam / A. N. Ostrikov, I. N. Stolyarov, S. V. Yuretsky // Sesiunii De Comunicări Științifice. – University „George Barițiu” Din Brașov – Bucharest-Romania: University „George Barițiu” Din Brașov, 2014. – 124 p.

**2. Остриков, А. Н.** Исследование аминокислотного и витаминного состава растительного сырья в процессе обжарки перегретым паром / А.Н. Остриков, И.Н. Столяров // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство». – Воронеж: ВГУИТ, 2013. – С. 208-209

**3. Остриков, А. Н.** Адаптация кинетических закономерностей процесса обжарки к расчету и проектированию обжарочных аппаратов [Текст] / Остриков А.Н., Столяров И.Н. // Материалы Международной научно-технической конференции «Адаптация технологических процессов к пищевым машинным технологиям» В 3 ч. Ч. 2 Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж, 2012. – С. 104-105

**4. Остриков, А. Н.** Оценка показателей качества обжаренных желудей / А.Н. Остриков, И.Н. Столяров // *Материалы Международной научно-технической конференции «Биотехнологические системы в производстве пищевого сырья и продуктов: инновационный потенциал и перспективы развития».* – Воронеж: ВГУИТ, 2011. – С. 254 - 255.

**5. Столяров, И. Н.** Обоснование рациональных режимов обжарки каштанов / И.Н. Столяров // *Материалы студенческой научной конференции за 2011 год / Воронеж. гос. технол. акад.* – Воронеж, 2011. – С. 13

**6. Остриков, А. Н.** Определение теплофизических характеристик каштанов / А.Н. Остриков., И.Н. Столяров // *Материалы Международной научно-технической интернет-конференции «Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах» («ЭПАХПП-2011»).* — Воронеж: ВГТА, 2011. – С.235-237.

**7. Остриков, А. Н.** Физико-химические превращения, происходящие в каштанах в процессе обжарки перегретым паром / А.Н. Остриков., И.Н. Столяров // *Материалы II Международной научной конференции «Молодежная наука – пищевой промышленности».* – Ставрополь: СевКавГТУ, 2011. – С. 143-145.

**8. Остриков, А. Н.** Применение ступенчатых режимов в технологии обжарки растительного сырья перегретым паром / А.Н. Остриков., И.Н. Столяров // *Материалы I Международной научно-практической конференции «Современная наука: теория и практика».* – Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. – С. 471-473.

Подписано в печать \_\_\_\_\_. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

(ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Отдел полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

Адрес университета и отдела полиграфии  
394036, Воронеж, пр. Революции, 19