

На правах рукописи

**БАРАНОВ АНТОН ЮРЬЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
СПОСОБА СУШКИ ГРЕЧИХИ В АППАРАТЕ С  
ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

05.18.12 - Процессы и аппараты пищевых производств

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2014

Работа выполнена ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВПО «ВГУИТ»).

Научный руководитель: **Антипов Сергей Тихонович**  
заслуженный изобретатель РФ,  
доктор технических наук, профессор  
(ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»)

Официальные оппоненты: **Афанасьев Валерий Андреевич**  
доктор технических наук, профессор  
ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности, генеральный директор

**Иванов Владимир Владимирович**  
кандидат технических наук  
ЗАО институт «ЦЧР АГРОПРОМПРОЕКТ»  
заведующий механо-технологического сектора.

Ведущая организация – Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт консервной и овощесушильной промышленности» Российской академии сельскохозяйственных наук

Защита диссертации состоится «04» июля 2014 года в 12 часов 00 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 212.035.01 при Воронежском государственном университете инженерных технологий по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета инженерных технологий.

Автореферат размещен на сайте <http://vak2.ed.gov.ru> и на официальном сайте ФГБОУ ВПО «ВГУИТ» [www.vsuet.ru](http://www.vsuet.ru)

Автореферат разослан «30» апреля 2014 г.

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

**Калашников Г.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из основных направлений технического прогресса во всех без исключения отраслях промышленности является совершенствование технологических процессов путем повышения их эффективности.

Гречиха одна из наиболее важных сельскохозяйственных культур, являющаяся незаменимым продуктом питания. Гречневая крупа имеет высокие вкусовые качества, питательна, хорошо усваивается. Гречневую крупу относят к числу лучших диетических продуктов. Кроме того, гречиха является хорошим медоносом, а высокая усваивающая способность ее корневой системы способствует повышению плодородия почвы.

По данным Росстата в России посевные площади гречихи составляют 1,2 млн Га (из них около 50 тыс Га в Воронежской области). Валовый сбор гречихи в Российской Федерации 8 млн тонн (В воронежской области – 300 тысяч тонн). Доля малых и фермерских хозяйств среди всех хозяйств выращивающих гречиху с каждым годом увеличивается на 3...5 % и уже составляет порядка 30 %.

В настоящее время сушка гречихи осуществляется в сушильных установках для зерновых культур (шахтные, барабанные и пр.), которые характеризуются низкой эффективностью из-за невозможности обеспечения постоянного полного контакта поверхности продукта с теплоносителем.

В теорию сушки дисперсных материалов значительный вклад внесли такие отечественные и зарубежные ученые как А.В. Лыков, А.С. Гинзбург, В.И. Муштаев, Б.С. Сажин, П.А. Ребиндер, П.Г. Романков, В.И. Попов, И.Т. Кретов, С.Т. Антипов, К.Г. Филоненко, А.Н. Остриков, В.М. Ульянов, Б.И. Леончик, В.Е. Куцакова, М.А. Гришин, О. Кришер и многие другие.

При рассмотрении основных направлений совершенствования процесса сушки дисперсных продуктов, нами был сделан вывод о том, что качественная и эффективная сушка гречихи может быть реализована только при использовании аппаратов с активными гидродинамическими режимами, существующие в аппаратах с закрученным потоком теплоносителя.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР кафедры машин и аппаратов пищевых производств ВГУИТ на 2011-2015 гг. «Адаптация пищевых машинных технологий к тепло- и массообменным процессам на основе диагностики техники и технологии пищевых про-

изводств» (№ госрегистрации 01201253880), и в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (Государственный контракт № П2608 «Разработка ресурсосберегающей техники и технологии сушки сельскохозяйственных дисперсных продуктов во взвешенно-закрученном потоке теплоносителя»).

**Цель и задачи диссертационной работы.** Целью диссертационной работы является исследование процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя и совершенствование на этой основе процесса и оборудования для его осуществления.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- экспериментальное исследование свойств гречихи как объекта сушки;

- исследование и установление кинетических закономерностей процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя;

- исследование и оценка основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя;

- статистическое определение оптимальных режимов работы экспериментальной сушильной установки, позволяющее в широком диапазоне изменения входных параметров обеспечить максимальную эффективность сушки гречихи;

- разработка математического описания процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя;

- разработка высокоинтенсивных сушильных установок с закрученными потоками теплоносителя для сушки дисперсных материалов;

- разработка линии комплексной переработки гречихи;

- разработка способов автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в аппаратах с активной гидродинамикой и рециркуляцией теплоносителя;

- проведение промышленных испытаний процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя.

**Научная новизна.** Развита и дополнена теоретические положения, вносящие вклад в представления об изучаемом процессе сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя, расширяющие границы применимости полученных результатов.

Впервые, с использованием существующих экспериментальных методов, исследовано влияние влажности и температуры на физико-механические, структурно-сорбционные и теплофизические свойства гречихи, а также предложены математические уравнения, адекватно описывающие полученные экспериментальные зависимости.

Обоснован выбор технологических режимов проведения процесса сушки гречихи, изучены механизм и основные кинетические закономерности процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя, установлено влияние различных факторов на кинетику процесса сушки, проведена теоретическая оптимизация экспериментальной сушильной установки и выявлены рациональные интервалы изменения параметров процесса.

Предложено математическое описание процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя.

**Практическая значимость работы.** На основании комплекса исследований, проведенных в лабораторных и производственных условиях, показана целесообразность применения аппарата с закрученным потоком теплоносителя для сушки гречихи.

Разработан новый способ сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя.

Разработана линия комплексной переработки гречихи.

Разработаны оригинальные конструкции высокоинтенсивных сушильных установок: сушилка с активным гидродинамическим режимом, вихревая сушильная камера для сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом, сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя.

Предложены способы автоматического управления процессом сушки: способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в вихревом режиме, способ автоматического управления процессом сушки полидисперсных материалов во взвешенно-закрученном слое, способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой.

Новизна технических решений подтверждена патентами РФ 2335717, 2340853, 2350866, 2362102, 2425311, 2480693.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований по теме диссертации доложены и обсуждены на научных конференциях в Воронежском государственном университете инженерных технологий (с 2007 по 2014 гг.).

Результаты работы экспонировались на Межрегиональных постоянно действующих выставках в г. Воронеже и были отмечены 6-ю дипломами.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе, 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 6 патентов РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 193 страницах машинописного текста, содержит 89 рисунков и 17 таблиц. Список литературы включает 153 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, обозначены проблемные моменты в процессе переработки гречихи в России, охарактеризованы решаемые в работе задачи, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе** систематизированы данные об объекте исследования - гречихе, ее химическом и витаминном составе, направлениях использования продуктов из гречихи в народном хозяйстве РФ, технологиях ее переработки. Проанализированы современное состояние техники сушки зерновых и крупяных материалов, при этом выявлены основные ее недостатки применительно к сушке гречихи и основные возможности совершенствования и интенсификации процесса сушки дисперсных продуктов и создания высокоэффективного сушильного оборудования. Проведен обзор и анализ современных способов и аппаратов для сушки дисперсных материалов с использованием закрученных потоков теплоносителя.

На основании проведенного анализа обоснован выбор объекта исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены методы решения поставленных проблем.

**Во второй главе** представлены экспериментальные данные, характеризующие свойства гречихи как объекта сушки (физико-механические, теплофизические и гигротермические), необходимые для научного обоснования рациональных методов обработки и оптимальных режимов процесса, инженерного расчета процесса и аппаратов, а также создания современных систем автоматического регулирования, и описание методов их определения.

Исследования физико-механических характеристик показали, что с увеличением влажности гречихи от 5 до 25 % истинная плотность снижается от 1190 до 1120 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность снижается с 750 до 680 кг/м<sup>3</sup>, порозность слоя гречихи увеличивается с 0,36 до 0,38, статический угол естественного откоса изменяется с 34 до 46 °, а динамический с 27 до 40 °.

По методу, разработанному В.С. Волькенштейн, в зависимости от относительной влажности гречихи в интервале 12...22 % и температуры в интервале 293...363 К определены: коэффициент температуропроводности, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость (рис. 1 – 6).

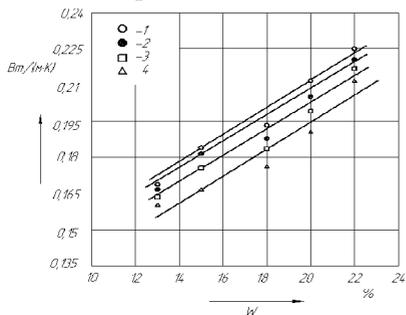


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К), от влажности при:  
1 – T=353 К; 2 – T=333 К;  
3 – T=313 К; 4 – T=293 К

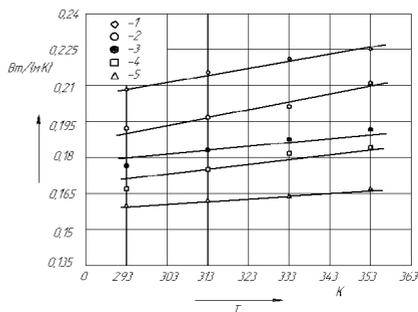


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К), от температуры при:  
1 – W=22 %; 2 – W=20 %; 3 – W=18 %;  
4 – W=15 %; 5 – W=13 %

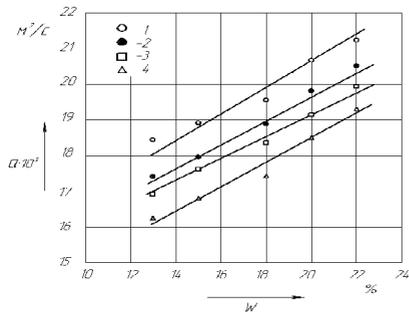


Рис. 3. Зависимость коэффициента температуропроводности  $\alpha \cdot 10^8$ , м<sup>2</sup>/с, от влажности при:  
1 – T=353 К; 2 – T=333 К;  
3 – T=313 К; 4 – T=293 К.

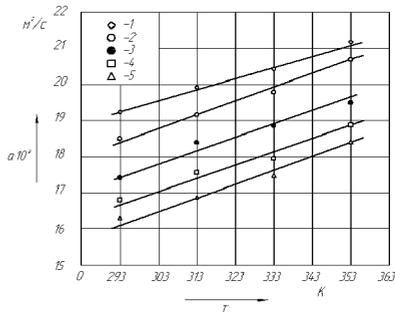


Рис. 4. Зависимость коэффициента температуропроводности  $\alpha \cdot 10^8$ , м<sup>2</sup>/с, от температуры при:  
1 – W=22 %; 2 – W=20 %;  
3 – W=18 %;  
4 – W=15 %; 5 – W=13 %.

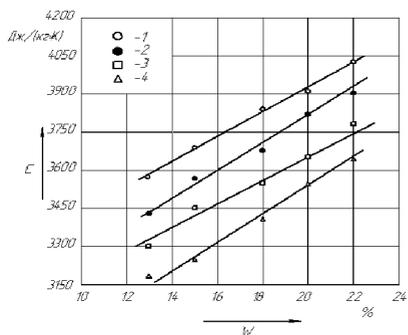


Рис. 5. Зависимость коэффициента удельной теплоемкости  $c$ , Дж/(кг·К), от влажности при:  
 1 –  $T=353$  К; 2 –  $T=333$  К;  
 3 –  $T=313$  К; 4 –  $T=293$  К.

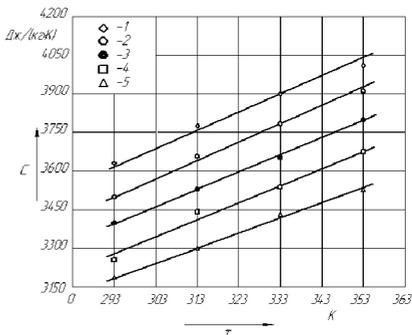


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К), от влажности при:  
 1 –  $W=22$  %; 2 –  $W=20$  %; 3 –  $W=18$  %;  
 4 –  $W=15$  %; 5 –  $W=13$  %.

Методом дифференциально-термического анализа кривой представленной на рисунке 7 и посредством анализа изотерм десорбции рисунка 8 исследованы формы связи влаги в гречихе. Установлено, что в гречихе при относительной влажности 22 % присутствует значительное количество физико-механически связанной влаги. Это позволяет сделать вывод, что для сушки гречихи до относительной влажности 14 % целесообразно использовать способ сушки с активным гидродинамическим режимом.

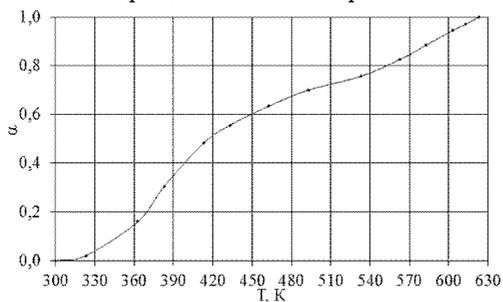


Рис. 7. Зависимость степени превращения  $\alpha$  вещества от температуры  $T$  гречихи при нагревании со скоростью подъема температуры  $3$  К/мин

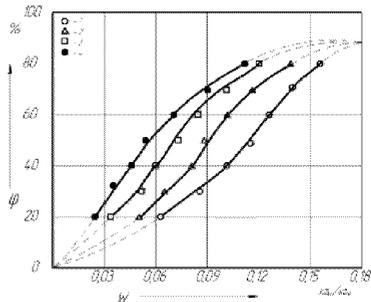


Рис. 8. Зависимости равновесной влажности гречихи от относительной влажности воздуха при температуре окружающего воздуха:  
 1 –  $T=293$  К; 2 –  $T=313$  К;  
 3 –  $T=333$  К; 4 –  $T=353$  К



сителя позволяет вычислить коэффициенты тепломассообмена от поверхности частицы к воздуху

$$\text{Nu} = 2 + 0,51 \text{Re}^{0,52} \text{Pr}^{0,33}, \quad (7)$$

$$\text{Nu}_M = 2 + 0,51 \text{Re}^{0,52} \text{Sh}^{0,33}, \quad (8)$$

где  $\text{Pr} = \nu_{\text{возд}} / \alpha_{\text{возд}}$ ,  $\text{Sh} = \nu_{\text{возд}} / D$ ,  $\text{Nu} = \alpha d_c / \lambda_{\text{возд}}$ ,  $\text{Nu}_M = \alpha_M d_c / D$ .

Дифференциальные уравнения процессов тепломассообмена в частице имеют вид

$$\frac{dU_L}{d\tau} = A_{11} \left( \frac{d^2 U_L}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dU_L}{dr} \right) + A_{12} \left( \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} \right), \quad (9)$$

$$\frac{dt}{d\tau} = A_{21} \left( \frac{d^2 U_L}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dU_L}{dr} \right) + A_{22} \left( \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} \right). \quad (10)$$

где  $A_{11} = a_M$ ;  $A_{12} = a_M \cdot \delta$ ;  $A_{21} = \frac{r_L \cdot \varepsilon}{c_q} a_M$ ;  $A_{22} = a_q + A_{21} \cdot \delta$ ;  $\varepsilon = a_{m1} / a_M$

Уравнения (9)-(10) решались численно с применением ЭВМ в среде MathCad. С полученной математической моделью были проведены численные эксперименты. Анализы результатов эксперимента представлены на рис. 10-13.

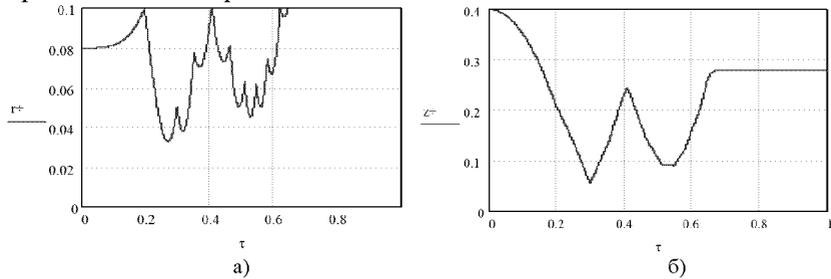


Рис10. Зависимость координат частицы от времени. а) -  $r_* = r_*(\tau)$ , б) -  $Z_* = Z_*(\tau)$ ,

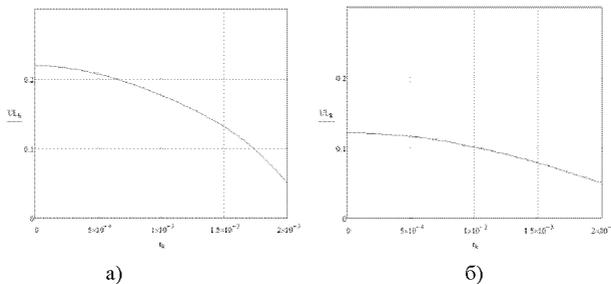


Рис. 11. Распределение влагосодержания в частице. а) -  $\tau=5$  с, б) -  $\tau=90$  с

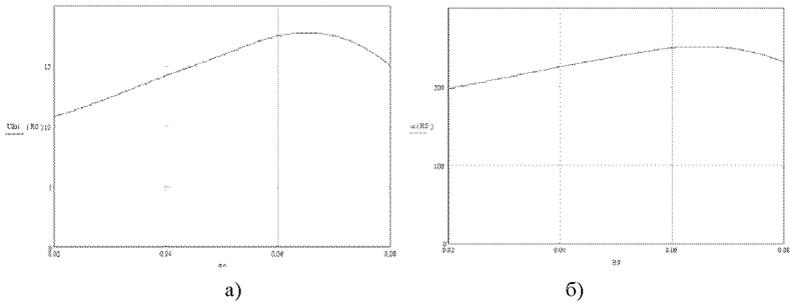


Рис. 12. Зависимость относительной скорости газа (а) и коэффициента теплоотдачи (б) от радиуса нижнего входного отверстия

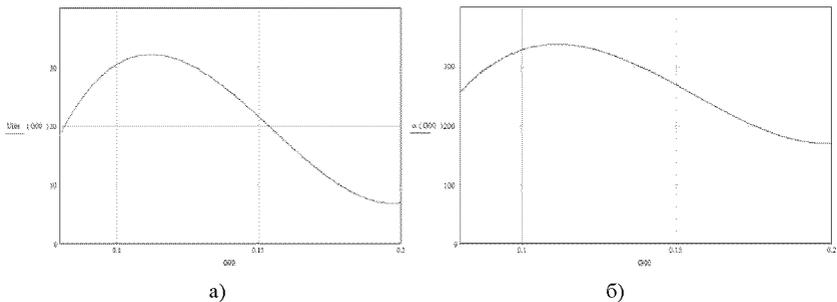


Рис. 13. Зависимость относительной скорости газа (а) и коэффициента теплоотдачи (б) от распределения воздушного потока между осевым и тангенциальными вводами теплоотдачи (б) от радиуса нижнего входного отверстия

Разработанная математическая модель и программа позволяют проанализировать влияние различных параметров на процесс сушки частицы. В частности, радиальная координата, при которой частица вводится в камеру  $r_{\text{вн}}$  влияет не значительно на среднюю относительную скорость газа  $\bar{U}_{\text{отн}}$  и коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ .

Выполненная оценка влияния радиуса нижнего патрубка для подачи воздуха  $R_0$  на выше рассмотренные параметры. В результате выявлено, что коэффициент теплоотдачи имеет экстремум при  $R_0 = 0,067 \text{ м}$  ( $R_0/R_1 = 2/3$ ) (рис. 13).

Другим важным технологическим моментом, определяющим эффективность работы сушилки является правильное распределение воздушного потока между осевым и тангенциальными вводами. Так, при общем расходе воздуха  $G_{\text{воз}} = 0,21 \text{ кг/с}$ , наблюдается экстремум при  $G_{\text{ос}} = 0,165 \text{ кг/с}$  и  $G_{\text{то}} = 0,045 \text{ кг/с}$ .

Аналогично оценивается влияние остальных параметров на эф-

фективность процесса сушки.

**В четвертой главе** для исследования кинетики сушки гречихи

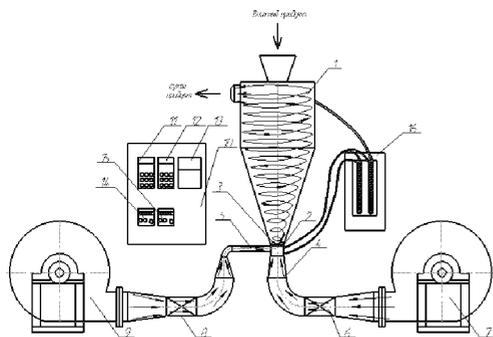


Рис. 14. Схема экспериментальной установки:  
1 – сменная сушильная камера; 2- завихритель;  
3 – удерживающая решетка; 4 - осевой патрубок для подачи сушильного агента; 5 – тангенциальный патрубок для подачи сушильного агента; 6, 8 – калориферы; 7, 9 – вентиляторы; 10 – щит управления; 11, 12 – частотные преобразователи для регулирования подачи вентиляторов; 13 – электрический счетчик; 14, 15 – регуляторы температуры в калориферах, 16 – дифференциальный манометр

была спроектирована и изготовлена экспериментальная сушильная установка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя, конструкция которой представлена на рис. 14.

Для исследования и постановки опытов с целью определения оптимального режима сушки было применено центральное композиционное униформ – ротативное планирование и выбран полный факторный эксперимент типа  $2^3$ .

На основании литературных данных и предварительных экспериментальных исследований из множества

факторов, влияющих на процесс сушки, для исследования были выбраны следующие: соотношение диаметров конической части корпуса  $D/d$ , температура  $T_{ca}$  теплоносителя, и расход  $Q_t$  тангенциально подводимого потока теплоносителя. От этих параметров зависит не только скорость сушки, но и качество высушиваемого материала. Изучая их взаимное влияние на процесс, можно выявить оптимальный режим сушки и оптимальную конструкцию камеры.

Влияние отношения  $D/d$  сушильной камеры на кинетику сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя представлено на рис. 15.

Полученные кривые свидетельствуют о том, что соотношение диаметров конической части корпуса в сушилке с закрученными потоками оказывает существенное влияние на скорость сушки гречихи. Анализ графиков показывает, что в начале процесса, когда влажность материала уменьшается по кривой, имеет место кратковременная стадия прогрева материала.

Влияние температуры теплоносителя на кинетику сушки гречи-

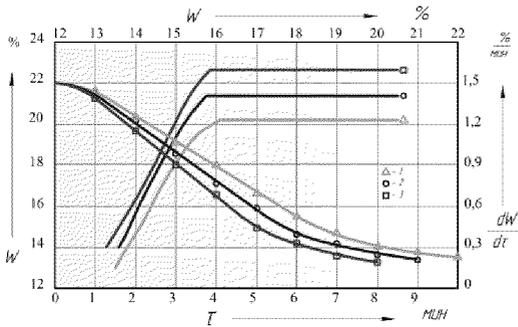


Рис. 15. Кривые сушки и скорости сушки гречихи:

- 1 –  $D/d=0.5$ ,  $T_{ca}=358$  К,  $Q\tau=31$   $M^3 / ч$
- 2 –  $D/d=0.33$ ,  $T_{ca}=358$  К,  $Q\tau=31$   $M^3 / ч$
- 3 –  $D/d=0.17$ ,  $T_{ca}=358$  К,  $Q\tau=31$   $M^3 / ч$

ет влияние на соотношения периодов постоянной и убывающей скоростей сушки. С повышением температуры наблюдается снижение критической влажности. Это объясняется тем, что увеличение температуры интенсифицирует внутреннюю диффузию влаги, а также увеличением доли связанной влаги, испарение которой происходит в первый период сушки.

Из рисунка 17 видно, что наибольшая часть влаги удаляется в

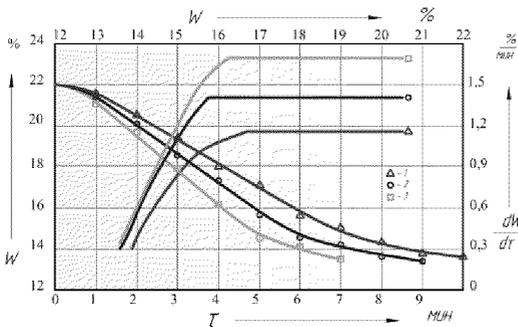


Рис. 16. Кривые сушки и скорости сушки гречихи:

- 1 –  $D/d=0.5$ ,  $T_{ca}=358$  К,  $Q\tau=31$   $M^3 / ч$
- 2 –  $D/d=0.33$ ,  $T_{ca}=358$  К,  $Q\tau=31$   $M^3 / ч$
- 3 –  $D/d=0.17$ ,  $T_{ca}=358$  К,  $Q\tau=31$   $M^3 / ч$

период постоянной скорости сушки. Это объясняется тем, что гречиха содержит большое количество осмотической и адсорбционно-связанной влаги. Наличие периода постоянной скорости сушки говорит о том, что интенсивность диффузии влаги превышает интенсивность влагообмена.

Влияние тангенциального расхода теплоносителя на кинетику сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя представлено на рис. 17.

Влияние тангенциального расхода теплоносителя на кинетику сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя представлено на рис. 17.

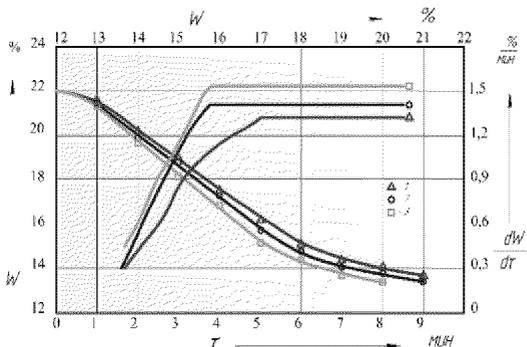


Рис. 17. Кривые сушки и скорости сушки гречихи:

1 –  $D/d=0.33$ ,  $T_{ca}=358$  К,  $Q\tau=4$   $M^3 / ч$

2 –  $D/d=0.33$ ,  $T_{ca}=358$  К,  $Q\tau=31$   $M^3 / ч$

3 –  $D/d=0.33$ ,  $T_{ca}=358$  К,  $Q\tau=110$   $M^3 / ч$

значения и остается постоянной (первый период). Когда влажность продукта достигнет первой критической точки, скорость сушки уменьшается по кривой, обращенной выпуклостью к оси ординат. Для такой формы кривой первая ее часть (читая график, справа налево) соответствует перемещению капиллярной влаги при решающем влиянии коэффициента диффузии, а вторая часть – адсорбционно-связанной. Вторая критическая точка (точка перегиба кривой скорости сушки) соответствует границе адсорбционной и капиллярной влаги.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя:

$$y_1 = 2,6 - 0,11x_1 - 0,09x_2 - 0,03x_3 - 0,04x_1^2 - 0,06x_2^2 - 0,03x_3^2 - 0,06x_1x_2 - 0,03x_1x_3 - 0,08x_2x_3; \quad (11)$$

$$y_2 = 15,27 + 0,28x_1 + 0,75x_2 + 0,97x_3 - 0,68x_1^2 - 0,28x_2^2 - 0,36x_3^2 + 0,27x_1x_2 + 0,11x_1x_3 + 0,37x_2x_3. \quad (12)$$

Выбор критериев оценки  $y$  обусловлен их наибольшей значимостью для процесса сушки. Так  $y_1$  – удельные энергозатраты на килограмм испаренной влаги – определяют энергоемкость процесса и являются одним из важных показателей, оценивающий его энергетическую эффективность, (кВт·ч)/кгвл;  $y_2$  – напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге – определяет производительность

Из графика видно, что величина тангенциального расхода теплоносителя в незначительной степени влияет на изменение скорости влагоудаления по отношению к другим факторам.

Установлено, что скорость сушки гречихи в начале процесса резко увеличивается, (период прогрева), достигает максимального

процесса, и напрямую связана с его скоростью, кгвл/(м<sup>3</sup>·ч).

Анализ уравнений регрессии (11), (12) позволил выделить факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс сушки. Так и на удельные энергозатраты и на напряжение сушильной камеры по испаренной влаге наибольшее влияние оказывает соотношение диаметров конической части сушильной установки и температура теплоносителя.

По регрессионным моделям (11), (12) были построены инженерные номограммы для определения режимных параметров процесса (рис. 18), а также поставлена и решена задача оптимизации, которая была сформулирована следующим образом: найти такие режимы работы сушильной установки, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров обеспечивали минимум удельных энергозатрат на испарение из продукта одного килограмма влаги и максимальное напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге. Поиск рациональных режимов процесса показал, что для выходных параметров в качестве рациональных должны быть приняты следующие интервалы значений: соотношение диаметров конической части  $d/D = 0,2...0,34$ ; температура сушильного агента 358...373 К; количество подводимого теплоносителя через тангенциальный патрубок 25,5...57,0 м<sup>3</sup>/ч.

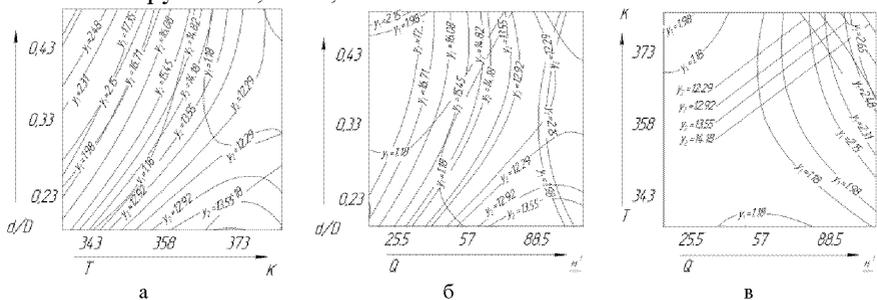


Рис. 18. Номограммы для определения удельных энергозатрат  $y_1$  и напряжения объема сушильной камеры по испаренной влаге  $y_2$ :

а) при  $d/D = 0.33$ ; б) при  $T = 358$  К; в) при  $Q\tau = 31$

**В пятой главе** на основании теоретических и экспериментальных исследований разработано оригинальное машинное оформление линии по переработке гречихи с использованием аппаратов с закрученным потоком теплоносителя (рис. 19).

Предложены конструкции перспективных высокоинтенсивных сушильных установок (рис. 20) с закрученным потоком теплоносителя.

С целью повышения эффективности процесса сушки и обеспечения энерго- и ресурсосбережения разработаны способы автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя (рис. 21) в аппаратах с активной гидродинамикой.

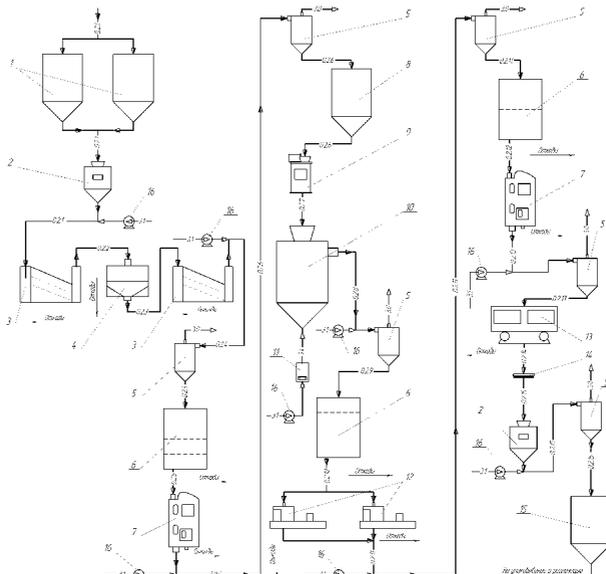
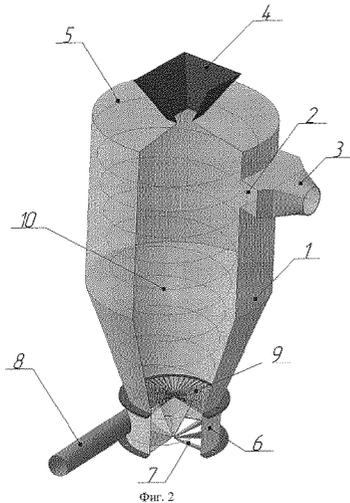


Рис. 19 Машинная технология переработки зерна гречихи



Фиг. 2

Рис. 20. Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя  
 1 – сушильная камера  
 2 – окно  
 3. - патрубок  
 4 – загрузочный лоток  
 5 – крышка  
 6 – патрубок для ввода осевого потока теплоносителя  
 7 – завихритель  
 8 – патрубок для тангенциального ввода теплоносителя  
 9 – удерживающая решетка  
 10 – траектория движения сушильного агента и продукта в камере

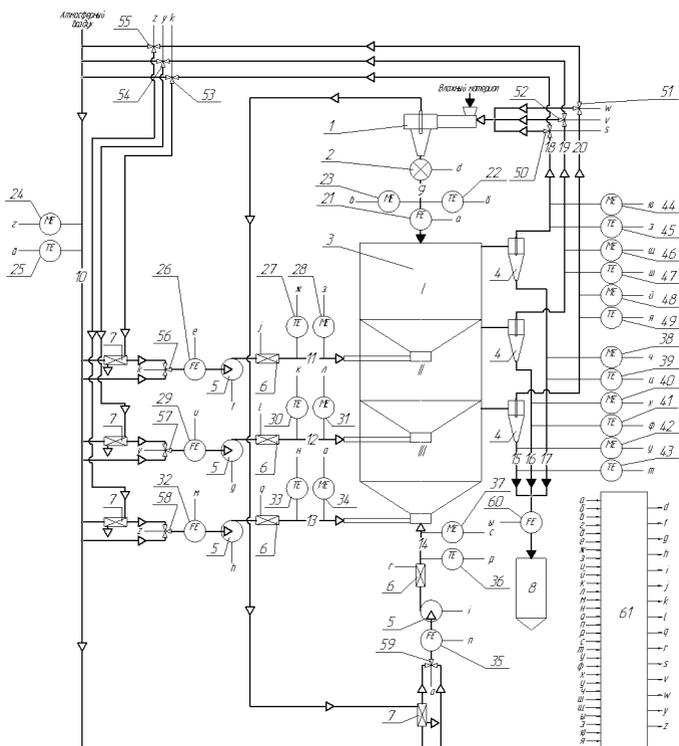


Рис. 21 способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Исследовано влияние влажности гречихи на ее физико-механические, теплофизические и гигротермические свойства, определены энергетические формы связи влаги с материалом.
2. Предложено математическое описание процесса сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя, в результате численного моделирования получено полное описание поведения частицы гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя, выявлены эффективные конструктивные размеры сушильной камеры.
3. Изучены механизм и основные кинетические закономерности процесса сушки гречихи, в результате чего обоснован выбор технологических режимов проведения процесса сушки гречихи в аппарате с закрученными потоками теплоносителя.

4. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс сушки гречихи в аппарате с закрученным потоком теплоносителя.

5. Поиск рациональных режимов процесса показал, что для выходных параметров в качестве рациональных должны быть приняты следующие интервалы значений: соотношение диаметров конической части  $d/D = 0,2...0,34$ ; температура сушильного агента  $358...373$  К; количество подводимого теплоносителя через тангенциальный патрубок  $25.5...57$  м<sup>3</sup>/ч

6. Разработана оригинальная линия комплексной переработки гречихи.

7. Разработаны оригинальные конструкции высокоинтенсивных сушильных установок с закрученным потоком теплоносителя.

8. Предложены способы автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в вихревом режиме, во взвешенно-закрученном слое и способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой.

#### Условные обозначения

$c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $T$  – температура теплоносителя, К;  $W$  – влажность по сухим веществам, %;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $G_{oo}$  – расход осевого потока теплоносителя, кг/с;  $G_{\tau o}$  – расход тангенциального потока теплоносителя, кг/с;  $G_{\omega o}$  – общий расход теплоносителя, кг/с;  $\Omega_{oo}$  – угловая скорость вращения осевого потока теплоносителя рад/с,  $\Omega_{\tau o}$  – угловая скорость вращения тангенциального потока теплоносителя рад/с,  $U$  – скорость теплоносителя м/с;  $m_p$  – масса частицы кг,  $F_v$  – сила аэродинамического сопротивления, Н;  $F_{\omega}$  – центробежная сила;  $\tau$  – время, с;  $C_D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы,  $U_{\text{отн}}$  – скорость воздуха относительно частицы,  $S_m$  – площадь миделева сечения частицы,  $\alpha_{\text{возд}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $D$  – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе,  $\alpha_m$  – коэффициент диффузии влаги в материале;  $\delta$  – относительный коэффициент термодиффузии;  $r_L$  – теплота конденсации пара;  $\varepsilon$  – относительный коэффициент диффузии пара;  $\alpha_{\text{мл}}$  – коэффициент диффузии пара в материале;  $\alpha_q$  – коэффициент температуропроводности материала;

$U_L$  - влагосодержание;  $t$  - температура, Pr - число Прандтля для воздуха; Sh - число Шмидта; Nu - число Нуссельта;  $Nu_m$  - число Нуссельта для массообмена

### Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

#### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов [Текст] / А.В. Журавлев, И.М. Черноусов, А.Ю. Баранов // Научно - теоретический журнал «Вестник Воронежской государственной технологической академии», Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. - 2008. - № 1. - С. 50-53.
2. Исследование форм связи влаги в семенах амаранта сорта Ультра методом дифференциально-термического анализа [Текст] / С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, И.В. Кузнецова, И.М. Черноусов, А.Ю. Баранов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2010. № 8. С. 40-41.
3. Сушка малоценных продуктов разделки рыб при производстве сухих основ для бульонов, супов и соусов быстрого приготовления [Текст] / Л.В Антипова, Ю.Н. Воронцова, А. Ю. Баранов, Е. В. Буданцев // Научно - теоретический журнал «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий», Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. - 2012. - № 3. - С. 12-15
4. Исследование форм связи влаги гречихи методом термического анализа [Текст] / С. Т. Антипов, А.В. Журавлев, А. В. Бородкина, А. Ю. Баранов // Научно - теоретический журнал «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий», Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. - 2013. - № 2. - С. 25-28.
5. Разработка высокоинтенсивной сушилки с регулируемым закрученным потоком теплоносителя [Текст] / С. Т. Антипов, А.В. Журавлев, А. В. Бородкина, А. Ю. Баранов // Научно - теоретический журнал «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий», Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. - 2013. - № 4. - С. 47-49
6. Исследование кинетики сушки гречихи в сушилке с закрученными потоками теплоносителя [Текст] / С. Т. Антипов, А.В. Журавлев, А. В. Бородкина, А. Ю. Баранов // Научно - теоретический журнал «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий», Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. - 2014. - № 1. - С. 43-45

#### Патенты

7. Пат. 2335717 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 26 В 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов в вихревом режиме [Текст] / Антипов С. Т., А.В. Журавлев, Черноусов И. М., Баранов А. Ю.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. - № 2007113076/06; заявл. 10.04.2007; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 28.
8. Пат. 2340853 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 26 В 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки полидисперсных материалов во взвешенно-закрученном слое [Текст] / Антипов С. Т., А.В. Журавлев, Черноусов И. М., Баранов А. Ю.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. - № 2007113078/06; заявл. 10.04.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34
9. Пат. 2350866 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 26 В 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки дисперсных материалов с рециркуляцией теплоносителя в аппаратах с активной гидродинамикой [Текст] / Антипов С. Т., А.В. Журавлев, Черноусов И. М., Баранов А. Ю. Журавлев В.В; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. - 2007149211/06; заявл. 10.12.2008; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 32
10. Пат. 2362102 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 26 В 17/10. Сушилка с активным гидродинамическим режимом [Текст] / Антипов С. Т., А.В. Журавлев, Черноусов И. М., Баранов А. Ю.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. - 2008109396/06; заявл. 11.03.2008; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20

**11. Пат. 2425311 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 26 B 17/10.** Вихревая сушильная камера для сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ-энергоподводом [Текст] / Антипов С. Т., А.В. Журавлев, Казарцев Д.А., Бунин Е.С., Баранов А. Ю.; Юрова И.С. заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – 20101115946/06; заявл. 21.01.2010; опубл. 27.07.2011, Бюл. № 21

**12. Пат. 2480693 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 26 B 17/10.** Сушилка с регулируемым закрученным потоком теплоносителя [Текст] / Антипов С. Т., А.В. Журавлев, Казарцев Д.А., Баранов А. Ю.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – 2011113204/06; заявл. 05.04.2011; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 21

#### Статьи и тезисы

**13. А.В. Журавлев.** Пути повышения эффективности гидродинамической обстановки в аппаратах со взвешенном слое [Текст] / А.В. Журавлев, И. М. Черноусов, А.Ю. Баранов// Материалы XLVI отчетной научной конференции за 2008 год: В 3 ч. Ч. 2 / Воронеж. гос. технол. акад.– Воронеж : ВГТА, 2008. - С. 75-78.

**14. Антипов, С. Т.** Разработка высокоинтенсивной мобильной сушильной установки [Текст] / С. Т. Антипов, А.В. Журавлев, А. Ю. Баранов, И.С. Терехин// Международная научно-техническая конференция (заочная) «Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство»/ Воронеж. гос. универ. инж. технол. – Воронеж : ВГУИТ, 2013. С. - 895.

Подписано в печать 29.04.2014 г. Формат 60 x 84 1/16  
Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_.

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»  
(ФГБОУ ВПО «ВГУИТ»)  
Отдел полиграфии ФГБОУ ВПО «ВГУИТ»  
Адрес университета и отдела полиграфии:  
394036, г. Воронеж, пр. Революции, 19