

На правах рукописи



КВАСОВ Александр Вячеславович

**РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПОСОБА
ПОЛУЧЕНИЯ АМИДОМИНЕРАЛЬНОГО
СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА**

Специальность:

05.18.12 - Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Воронеж – 2020

□

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Дранников Алексей Викторович

Официальные оппоненты – **Максименко Юрий Александрович**
доктор технических наук, доцент
(ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»), проректор по научной работе и инновациям

Нестеров Дмитрий Андреевич
кандидат технических наук
(АО «Научно-производственный центр «ВНИИ комбикормовой промышленности»), начальник отдела разработки новых технологий, оборудования и конструкторских работ

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж

Защита состоится «17» сентября 2020 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 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 в сети Интернет на официальных сайтах Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «06» июля 2020 г.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «15» июня 2020 г. Автореферат разослан «10» августа 2020 г.

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



Л. Н. Фролова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На свеклосахарных заводах РФ ежегодно перерабатывается более 40 млн т. сахарной свеклы. При этом количество прессованного жома составляет 10...12 млн т., а количество сухого свекловичного жома – 2,3...2,5 млн т., из которых в настоящее время только половина подвергается высушиванию и гранулированию непосредственно на корм скоту. Следовательно, невостребованным остается примерно 1 млн т. сухого свекловичного жома, который мог бы быть высушен и в дальнейшем эффективно использован. А так он либо скармливается в сыром виде (не более 15 %), что является нецелесообразным, либо просто гниет в жомовых ямах, загрязняя окружающую среду.

Получение сухого жома, обладающего высокой кормовой ценностью, учитывая масштабы производства, может в значительной мере способствовать решению вопроса – создания кормовой базы для сельского хозяйства, что подтверждается ежегодным устойчивым ростом производства комбикормов и премиксов в РФ. Важными являются вопросы энерго- и ресурсосбережения, решение которых позволит получить качественную и конкурентоспособную продукцию, обеспечивающую отечественное сельское хозяйство высококачественными комбикормами и кормовыми добавками.

Кормовая ценность свекловичного жома может быть повышена путем его обогащения такими добавками, как меласса, карбамид и соли микроэлементов. В настоящее время одной из причин, сдерживающих наиболее эффективное использование свекловичного жома, обогащенного различными добавками, является отсутствие энергосберегающего способа получения амидоминерального гранулированного свекловичного жома и линии для его реализации.

В связи с этим актуальной является разработка способа получения обогащенного свекловичного жома, который в дальнейшем может быть использован не только как ценный кормовой продукт в кормлении сельскохозяйственных животных, но и как компонент в составе различных комбикормов.

Значительный вклад в развитие теории сушки дисперсных материалов и совершенствование технологии комбикормового производства внесли такие ученые, как: Лыков А.В., Михайлов Ю.А., Леончик Б.И., Кретов И.Т., Парфенопуло М.Г., Караулов Н.Е., Егоров Г.А., Черняев Н.П., Афанасьев В.А., Панин И.Г., Behnke K., Niesar H. и др.

Работа проводилась в соответствии с планом НИР кафедры машин и аппаратов пищевых производств ВГУИТ на 2016-2019 гг. «Инновационное развитие техники пищевых технологий: машины, аппараты и биореакторы» № г.р. 01201253 ГРНТИ: 65.13.19; приоритетного направления развития НОЦ ВГУИТ «Энергоресурс» - «Разработка энергосберегающих технологий и оборудования пищевой и химической промышленности».

Цель работы: расширение ассортимента кормовых добавок на основе создания энергоэффективного способа получения амидоминарального гранулированного свекловичного жома.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**.

1. Анализ кинетических закономерностей процесса сушки свекловичного жома в барабанной сушилке с канальными насадками и обоснование рациональных режимов проведения процесса.

2. Математическое описание процессов тепломассообмена в частице свекловичного жома при конвективной сушке.

3. Изучение кинетических закономерностей процесса смешивания сухого свекловичного жома с рецептурными компонентами и определение рациональных условий проведения процесса.

4. Модернизация конструкции смесителя для получения однородной смеси.

5. Разработка конструкции барабанной сушилки для свекловичного жома с комбинированным энергоподводом.

6. Разработка способа получения амидоминарального гранулированного свекловичного жома.

7. Оценка технико-экономической эффективности предлагаемых технических и технологических решений.

8. Проведение промышленной апробации полученных результатов работы.

Научная новизна. Научно обоснована технология получения амидоминарального гранулированного свекловичного жома с вводом мелассы, карбамида и солей микроэлементов.

Установлены основные кинетические закономерности процесса сушки свекловичного жома в барабанной сушилке с канальными насадками. Разработана математическая модель, описывающая распределение полей температур и влагосодержания в частице свекловичного жома прямоугольной формы при конвективной сушке, позволяющая обеспечить максимальное кинетическое соответствие двухступенчатой сушилки свекловичного жома при практической реализации температурных

режимов в области допустимых технологических свойств высушиваемого продукта.

Установлены основные кинетические закономерности процесса смешивания свекловичного жома с рецептурными компонентами.

Разработаны статистические модели процесса сушки свекловичного жома и процесса смешивания его с рецептурными компонентами в широком интервале изменения входных факторов.

Практическая ценность. Разработана конструкция барабанной сушилки с комбинированным энергоподводом (пат. РФ № 270239), позволяющая повысить качество готового материала и интенсивность проведения процесса сушки за счет посекционной обработки жома с индивидуальным подводом сушильных агентов.

Определены рациональные режимы проведения процесса сушки свекловичного жома в барабанной сушилке с канальными насадками: температура сушильного агента на входе в сушильный барабан – 373...420 К; расход сушильного агента – 1,15...1,30 м³/с; удельная нагрузка свекловичного жома на сушильный барабан – 8...29 кг/ м³; частота вращения сушильного барабана – 1,10...2,35 мин⁻¹.

Предложен способ производства амидоминарального гранулированного свекловичного жома и линия для его осуществления (пат. РФ № 2674609), позволяющие повысить кормовые свойства сухого свекловичного жома вследствие обогащения его мелассой, карбамидом и солями микроэлементов.

Определены рациональные режимы проведения процесса смешивания сухого свекловичного жома с рецептурными компонентами: частота вращения рабочего органа смесителя – 40...80 мин⁻¹; степень заполнения рабочей камеры смесителя – 0,2...0,6; концентрация мелассы в смеси – 7,50...18,25 %; продолжительность смешивания – 80...140 с.

В условиях ОАО «Елань-Коленовский сахарный завод» проведены производственные испытания по определению условий получения амидоминарального гранулированного свекловичного жома, которые подтвердили принятые рациональные режимы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует п. 2, 3 и 4 паспорта специальности 05.18.12 - «Процессы и аппараты пищевых производств».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на ежегодных международных, национальных, научных, научно-технических и научно-практических конференциях, форумах и симпозиумах (Воронеж, 2018-2019) (Москва, 2018).

Результаты работы отмечены дипломом участника выставки «Агросезон» (Воронеж, 2016).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 1 статья в издании, индексируемом в международных базах цитирования Scopus, 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получено 4 патента РФ на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 18 таблиц. Список литературы включает 121 наименование, в том числе 18 зарубежных. Приложения к диссертации представлены на 11 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе представлены основные сведения о повышении кормовой ценности свекловичного жома; дан краткий анализ техники и технологии сушки свекловичного жома в барабанных сушилках; изложены особенности процессов тепло- и массообмена при сушке материалов в барабанных сушилках; приведены конструкции смесителей и краткие теоретические сведения процесса смешивания различных компонентов. Сформулированы цель работы и определены задачи ее решения.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований кинетики процесса сушки свекловичного жома в барабанной сушилке с канальными насадками. Исследования проводились на экспериментальной сушильной установке (рисунок 1).

Параметры процесса сушки в каждом опыте поддерживались постоянными в интервале значений: температура сушильного агента (воздуха) на входе в сушильный барабан $T_{\text{в}} = 373 \dots 433 \text{ К}$, расход воздуха $V_{\text{в}} = 0,8 \dots 1,5 \text{ м}^3/\text{с}$, удельная нагрузка $q_{\text{вд}} = 8 \dots 32 \text{ кг/ м}^3$, частота вращения барабана $n = 1 \dots 3 \text{ мин}^{-1}$, начальное влагосодержание жома $U_{\text{н}} = 0,8 \text{ кг/кг}$, конечное влагосодержание жома $U_{\text{к}} = 0,1 \dots 0,12 \text{ \%}$.

Угол наклона сушильного барабана во всех опытах составляет $3 \dots 5^\circ$. Кривые сушки, скорости сушки и кривые нагрева свекловичного жома сушильным агентом при различных режимных параметрах процесса представлены на рисунках 2-5.

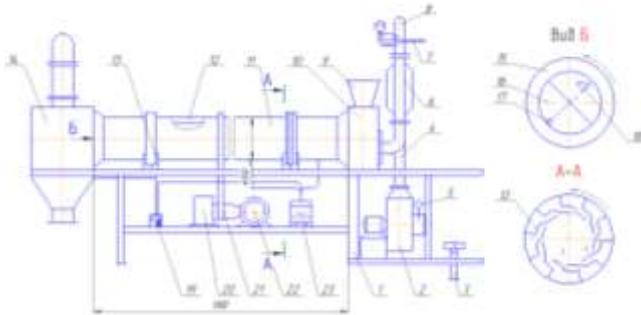
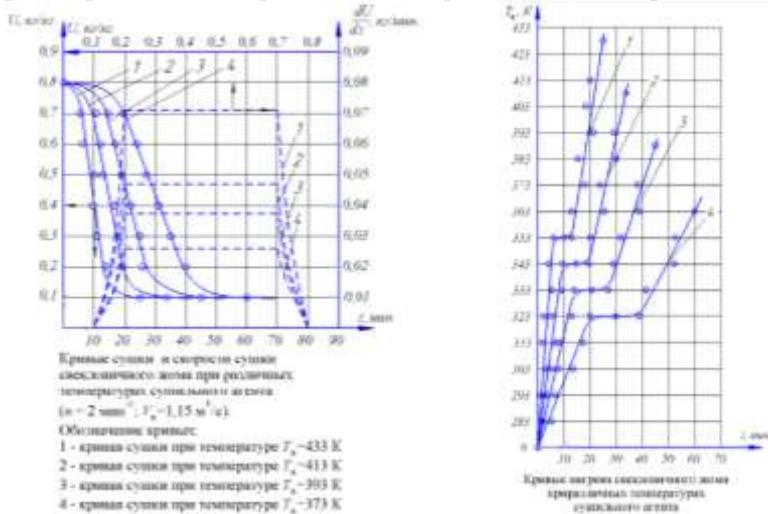


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной барабанной сушилки с канальной насадкой: 1 – рама; 2 – нагнетающий вентилятор; 3 – упорно-винтовое устройство; 4 – воздухопровод; 5 – шибер; 6 – электрокалорифер; 7 – «сухой» термометр; 8 – «мокрый» термометр; 9 – патрубок для ввода жома; 10 – загрузочная камера; 11 – барабан; 12 – канальная насадка; 13 – опорные ролики; 14 – камера выгрузки; 15 – подпорное кольцо; 16 – разгрузочный фланец; 17 – хромель-копелевые термодпары; 18 – уголок; 19 – измеритель-регулятор; 20 – редуктор; 21 – цепная передача; 22 – электродвигатель; 23 – термоанометр



а

б

Рисунок 2 – Кинетические кривые процесса сушки свежескопленного жома в барабанной сушилке: а – кривые сушки $U = f(t)$ (1-4) и скорости сушки $dU/dt = f(t)$ (1-4) свежескопленного жома при различных температурах сушильного агента; б – кривые нагрева $T_B = f(t)$ свежескопленного жома при различных температурах сушильного агента, К



Рисунок 3 – Кривые сушки $U = f(\tau)$ (1-3) и скорости сушки $dU/d\tau = f(\tau)$ (1-3) жома при различном расходе воздуха в сушильном барабане

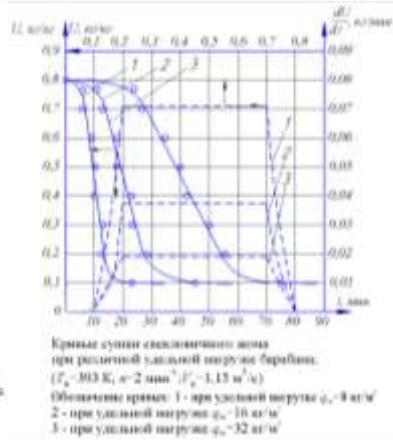


Рисунок 4 – Кривые сушки $U = f(\tau)$ (1-3) и скорости сушки $dU/d\tau = f(\tau)$ (1-3) свекловичного жома при различной удельной нагрузке

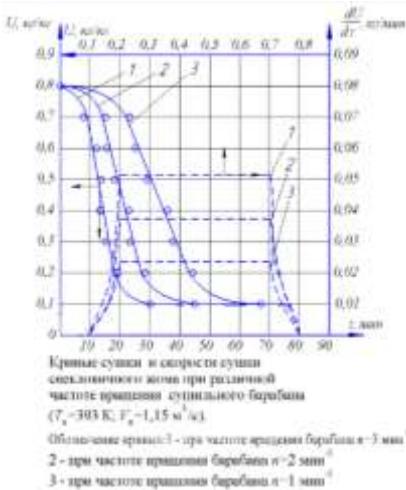


Рисунок 5 – Кривые сушки $U = f(\tau)$ (1-3) и скорости сушки $dU/d\tau = f(\tau)$ (1-3) свекловичного жома при различной частоте вращения сушильного барабана

Увеличение температуры воздуха от 373 до 433 К ведет возрастанию скорости сушки, следовательно к сокращению продолжительности процесса. При увеличении скорости сушки период прогрева сокращается, а кривая выглядит менее пологой. Увеличение скорости движения воздуха также ускоряет процесс высушивания и удаление влаги с поверхности материала проходит наиболее интенсивно. При увеличении удельной нагрузки материала на поверхность канальной насадки повышается сопротивление материала, что замедляет процесс сушки. Увеличение частоты оборотов сушильного барабана приводит к интенсификации процесса.

Характер изменения кривых соответствует периодам прогрева, постоянной и убывающей скорости сушки. Процесс сушки свекловичного жома в барабанной сушилке начинается с прогрева продукта, и всё тепло приходится на нагрев продукта, что видно на кривых нагрева, испарение основного количества влаги приходится на период постоянной сушки.

В результате математической обработки кинетических закономерностей были получены критериальные уравнения, описывающие процесс теплообмена между материалом и сушильным агентом.

Для периода постоянной скорости сушки:

$$\text{Nu} = 1,23\text{Re}^{1,45}\text{Pe}^{0,54}. \quad (1)$$

Для периода убывающей скорости сушки:

$$\text{Nu} = 3,17\text{Re}^{0,28}\text{Pe}^{0,32}\text{Gu}^{0,78}. \quad (2)$$

Зависимости (1) и (2) справедливы в следующих интервалах изменения режимных параметров: температура сушильного агента (воздуха) на входе в сушильный барабан $T_{\text{в}} = 373...433 \text{ K}$, расход воздуха $V_{\text{в}} = 0,8...1,5 \text{ м}^3/\text{с}$, удельная нагрузка $q_{\text{вд}} = 8...32 \text{ кг}/\text{м}^3$, частота вращения барабана $n = 1...3 \text{ мин}^{-1}$, начальное влагосодержание жома $U_{\text{н}} = 0,8 \%$, рекомендуемая конечное влагосодержание $U_{\text{к}} = 0,1...0,12 \%$. Угол наклона сушильного барабана во всех опытах составляет примерно $3-5^\circ$.

Для исследования взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс сушки свекловичного жома в барабанной сушилке с канальными насадками, было применено центральное композиционное ротатабельное равномер-планирование с полным факторным экспериментом ПФЭ 2^4 .

В качестве основных факторов, влияющих на процесс сушки, были выбраны: X_1 – температура сушильного агента на входе в сушильный барабан, K; X_2 – расход сушильного агента, $\text{м}^3/\text{с}$; X_3 – удельная нагрузка свекловичного жома на сушильный барабан, $\text{кг}/\text{м}^3$; X_4 – частота вращения сушильного барабана, мин^{-1} . Все эти факторы совместимы и некоррелируемы между собой.

Выбор интервалов изменения входных факторов обусловлен технологическими условиями процесса сушки свекловичного жома, возможностью уноса частиц материала из сушильного барабана, а также технико-экономическими показателями процесса. Критериями оценки влияния входных факторов на процесс были выбраны: Y_1 – удельные энергозатраты процесса сушки, отнесенные на 1 кг испаренной влаги, (кВт·ч)/кг; Y_2 – влагонапряжение сушильной камеры, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$.

В результате математической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие данный процесс под влиянием исследуемых факторов:

$$Y_1 = 2,24 + 0,223X_1 + 0,054X_2 + 0,168X_3 + 0,034X_4 - \\ -0,0172X_1^2 - 0,0285X_2^2 - 0,0085X_3^2 - 0,021X_4^2 - \\ -0,0025X_1X_2 - 0,00125X_1X_3 + 0,0025X_1X_4 - 0,00125X_2X_3 - \\ -0,0025X_2X_4 - 0,00625X_3X_4 \quad (3)$$

$$Y_2 = 128,25 + 7,9218X_1 + 5,6718X_2 + 4,005X_3 + 3,9739X_4 - \\ -3,2799X_1^2 + 0,1575X_2^2 - 1,3424X_3^2 - 0,4986X_4^2 - \\ -0,2109X_1X_2 - 0,2109X_1X_3 + 0,2109X_1X_4 - 0,2109X_2X_3 - \\ +0,2109X_2X_4 + 0,2109X_3X_4 \quad (4)$$

Задача оптимизации сформулирована следующим образом: найти такие режимы работы сушилки, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров процесса сушки составляли минимум удельных энергозатрат и максимум влагонапряжения сушильной камеры.

В результате были получены рациональные режимы проведения процесса сушки свекловичного жома: $X_1 = 373...420$ К; $X_2 = 1,15...1,30$ м³/с; $X_3 = 8...29$ кг/м³; $X_4 = 1,10...2,35$ мин⁻¹.

В третьей главе приведена математическая модель процесса сушки свекловичного жома в барабанной сушилке. При этом частица жома представляется в форме параллелепипеда, в которой перенос теплоты и массы обусловлен фазовыми превращениями и описывается дифференциальными уравнениями материального и теплового балансов:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \text{div} \left[k(C, T) \cdot (\text{grad} C + \delta_r(C, T) \text{grad} T) \right], \quad (5)$$

$$c \rho_o \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div} \left(\lambda(C, T) \cdot \text{grad} T \right) + q \rho_o \frac{\partial C}{\partial \tau}. \quad (6)$$

Уравнение теплопроводности с подвижными границами, при условии, что теплообменные коэффициенты постоянные на интервале времени $[0, \tau_k]$, $\tau_k \leq \tau_k$, представлялось в виде уравнения теплопроводности с неподвижными границами:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\varepsilon r_c}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (7)$$

с начальным условием

$$t = t_{\text{н}} \text{ при } \tau = 0; \quad (8)$$

и граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial x} - \alpha(t - t_c) &= 0 \text{ при } x = -l; \\ \frac{\partial t}{\partial x} + k(t - t_c) &= 0 \text{ при } x = l; \\ \frac{\partial t}{\partial y} - \alpha(t - t_c) &= 0 \text{ при } y = -l; \\ \frac{\partial t}{\partial y} + k(t - t_c) &= 0 \text{ при } y = l; \\ \frac{\partial t}{\partial z} - \alpha(t - t_c) &= 0 \text{ при } z = -l; \\ \frac{\partial t}{\partial z} - k(t - t_c) &= 0 \text{ при } z = l. \end{aligned} \quad (9)$$

Система уравнений (5)–(7) приведена к безразмерному виду:

$$\frac{\partial T}{\partial \text{Fo}} = \Delta T - \varepsilon \text{Ko} \frac{\partial U}{\partial \text{Fo}}, \quad (10)$$

$$T \Big|_{\text{Fo}=0} = 0, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=-1} + \text{Bi}(1 - T \Big|_{X=-1}) &= 0 \quad \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=1} - \text{Bi}(1 - T \Big|_{X=1}) = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{Y=-1} + \text{Bi}(1 - T \Big|_{Y=-1}) &= 0 \quad \frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{Y=1} - \text{Bi}(1 - T \Big|_{Y=1}) = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=-1} + \text{Bi}(1 - T \Big|_{Z=-1}) = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=1} - \text{Bi}(1 - T \Big|_{Z=1}) = 0.$$

Рассмотрено нестационарное трехмерное уравнение теплопроводности для параллелепипеда

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (13)$$

$$\left[\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha_{0n, \ln} T \right]_{n=0, \ln} = q_{0n, \ln}, \quad n = x, y, z, \quad (14)$$

$$T(x, y, z)|_{\tau=0} = T_0. \quad (15)$$

Здесь $q_v = \frac{\varepsilon r_c}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}$.

При численном решении по локально-одномерной схеме вводилась сеточная функция $u_{n,m,k}^j$, соответствующая температуре $T(x_n, y_m, z_k, \tau_j)$;

$$\begin{aligned} x_n &= (n-1)h_x, & y_m &= (m-1)h_y, \\ z_k &= (k-1)h_z \end{aligned} \quad (16)$$

где $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, K}$.

Локально-одномерная схема при пространственной сетке равномерной по каждой из координат x , y , z , имеет вид уравнения:

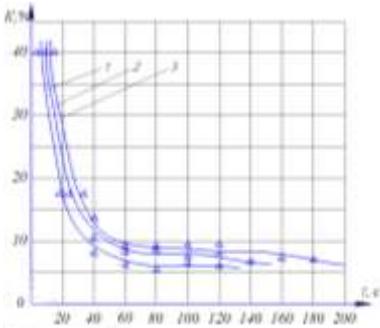
$$\begin{aligned} u_{n,m,2}^j &\left(1 + \frac{\alpha_{0z} h_z}{\lambda} + \frac{c \rho h_z^2}{2 \lambda \Delta \tau}\right) u_{n,m,1}^j + \\ &+ \frac{q_{0z} h_z}{\lambda} + \frac{h_z^2}{2 \lambda} \left(\frac{q_v}{3} + \frac{c \rho}{\Delta \tau} W_{n,m,1}^{j-1}\right) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} u_{n,m,k+1}^j &- \left(2 + \frac{c \rho h_z^2}{\lambda \Delta \tau}\right) u_{n,m,k}^j + \\ &+ u_{n,m,k-1}^j + \frac{h_z^2}{\lambda} \left(\frac{q_v}{3} + \frac{c \rho}{\Delta \tau} W_{n,m,k}^{j-1}\right) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$k = 2, \dots, K-1$$

$$\begin{aligned} - \left(1 + \frac{\alpha_{1z} h_z}{\lambda} + \frac{c \rho h_z^2}{2 \lambda \Delta \tau}\right) u_{n,m,K}^j + u_{n,m,K-1}^j + \\ + \frac{q_{1z} h_z}{\lambda} + \frac{h_z^2}{2 \lambda} \left(\frac{q_v}{3} + \frac{c \rho}{\Delta \tau} W_{n,m,K}^{j-1}\right) = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

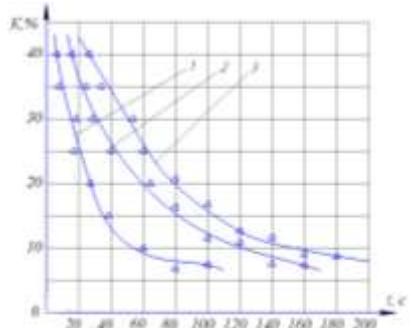
В четвертой главе представлены исследования по кинетике смешивания сухого свекловичного жома с рецептурными компонентами в смесителе в непрерывном режиме. Кривые смешивания жома при различных режимных параметрах процесса показаны на рисунках 6-9.



Обозначения кривых:

- 1 - кривая смешивания при частоте вращения рабочего органа $\omega = 40 \text{ мин}^{-1}$
- 2 - кривая смешивания при частоте вращения рабочего органа $\omega = 80 \text{ мин}^{-1}$
- 3 - кривая смешивания при частоте вращения рабочего органа $\omega = 120 \text{ мин}^{-1}$

Рисунок 6 – Кривые смешивания $K = f(t)$ (1-3) жома при различной частоте вращения рабочего органа



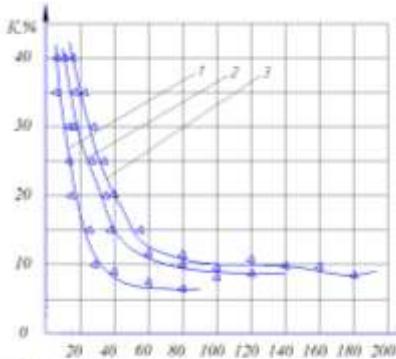
Обозначения кривых:

- 1 - кривая смешивания при различной степени заполнения смесителя $\rho = 0,2$
- 2 - кривая смешивания при различной степени заполнения смесителя $\rho = 0,3$
- 3 - кривая смешивания при различной степени заполнения смесителя $\rho = 0,5$

Рисунок 7 – Кривые смешивания $K = f(t)$ (1-3) жома при различной степени заполнения смесителя

Анализ кривых показывает, что увеличение частоты вращения рабочего органа смесителя, уменьшение степени заполнения камеры и концентрации мелассы приводит к уменьшению коэффициента вариации, следовательно, к сокращению времени смешивания.

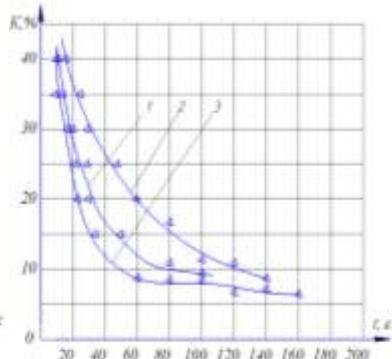
Это объясняется увеличением количества воздействий рабочих органов смесителя на частицы продукта в единицу времени, а также, достаточно высокой вязкостью вводимой в смеситель мелассы.



Обозначения кривых:

- 1 - кривая смешивания при различном количестве введенной мелассы $C_m = 10\%$
- 2 - кривая смешивания при различном количестве введенной мелассы $C_m = 12\%$
- 3 - кривая смешивания при различном количестве введенной мелассы $C_m = 15\%$

Рисунок 8 – Кривые смешивания $K = f(t)$ (1-3) жома при различном количестве введенной мелассы



Обозначения кривых:

- 1 - кривая смешивания при длительности смешивания $t = 100 \text{ с}$
- 2 - кривая смешивания при длительности смешивания $t = 140 \text{ с}$
- 3 - кривая смешивания при длительности смешивания $t = 160 \text{ с}$

Рисунок 9 – Кривые смешивания $K = f(t)$ (1-3) жома при различной продолжительности смешивания

Для оценки сил влияния различных факторов на процесс смешивания было применено центральное композиционное ротатабельное равномер-планирование с полным факторным экспериментом ПФЭ 2^4 .

В качестве основных факторов, влияющих на процесс сушки, были выбраны: X_1 – частота вращения рабочего органа смесителя, мин^{-1} ; X_2 – степень заполнения рабочей камеры смесителя; X_3 – концентрация мелассы в смеси, %; X_4 – продолжительность смешивания, с. Все эти факторы совместимы и некоррелируемы между собой.

Критериями оценки влияния входных факторов на процесс смешивания сухого свекловичного жома с рецептурными компонентами являются: Y_1 – удельные энергозатраты процесса смешивания, (кВт·ч)/кг; Y_2 – неоднородность смешивания, %.

В результате получены нелинейные уравнения регрессии, описывающие данный процесс:

$$Y_1 = 0,0014 + 0,2204X_1 + 0,053X_2 + 0,17X_3 + 0,0304X_4 - \\ -0,01427X_1^2 - 0,0305X_2^2 - 0,0055X_3^2 - 0,0205X_4^2 - \\ -0,001875X_1X_2 - 0,003125X_1X_3 - 0,003125X_1X_4 - 0,003125X_2X_3 - \\ -0,003125X_2X_4 - 0,00168X_3X_4 \quad (20)$$

$$Y_2 = 5 - 2,54X_1 + 0,79X_2 - 3,79X_3 - 0,708X_4 + \\ + 1,63X_1^2 + 5,135X_2^2 + 1,88X_3^2 - 1,114X_4^2 + \\ + 0,187X_1X_2 + 0,687X_1X_3 + 0,812X_1X_4 - 0,437X_2X_3 - \\ -0,562X_2X_4 + 0,687X_3X_4 \quad (21)$$

Задача оптимизации сформулирована следующим образом: найти такие режимы работы смесителя, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров процесса смешивания доставляли минимум удельных энергозатрат процесса смешивания и минимум неоднородности смеси. Общая математическая постановка задачи оптимизации представлена в виде следующей модели:

$$q = q(Y_1, Y_2) \xrightarrow{x \in D} \text{opt}; D : Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) \xrightarrow{x \in D} \min \\ Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4) \xrightarrow{x \in D} \min; Y_i \geq 0, i = \overline{1, 2}; X_j \leq [-2; 2], j = \overline{1, 4} \quad (22)$$

В результате были получены рациональные интервалы изменения входных параметров: $X_1 = 40 \dots 80 \text{ мин}^{-1}$; $X_2 = 0,2 \dots 0,6$; $X_3 = 7,5 \dots 18,25 \%$; $X_4 = 80 \dots 140 \text{ с}$.

В пятой главе представлена оригинальная конструкция барабанной сушилки для свекловичного жома с комбинированным энергоподводом (пат. РФ № 2702939), позволяющая повысить качество готового материала, так как предусмотрен индивидуальный привод каждой секции перфорированного барабана. Повышается интенсивность проведения процесса сушки свекловичного жома вследствие того, что обеспечивается посекционная сушка дисперсного материала сушильными агентами разного температурного потенциала (рисунок 10).

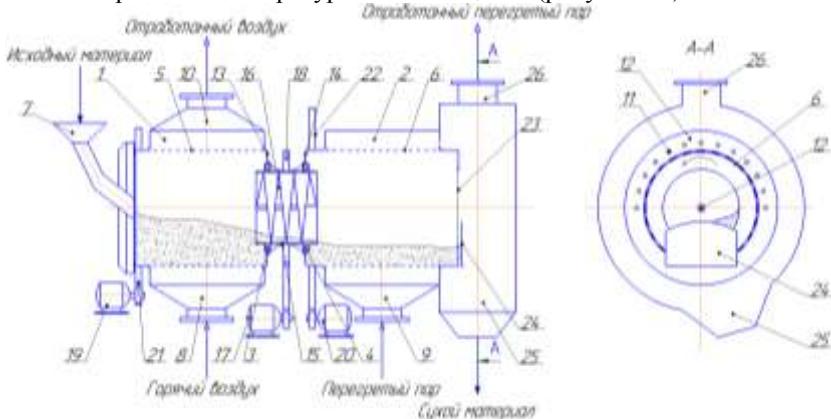


Рисунок 10 – Барабанная сушилка для свекловичного жома: 1, 2 – секции неподвижного цилиндрического кожуха; 3, 4 – подшипники качения; 5, 6 – секции перфорированного барабана; 7 – загрузочное устройство; 8 – патрубок для подачи горячего воздуха; 9 – патрубок для подачи перегретого пара; 10 – патрубок для отвода отработанного воздуха; 11 – отверстия для отвода отработанного перегретого пара; 12, 13, 14 – торцевые стенки; 15 – горизонтальный цилиндр; 16 – шнек; 17, 19, 20 – электродвигатель; 18, 21, 22 – зубчатая передача; 23 – отверстие; 24 – заслонка; 25 – бункер для выгрузки материала; 26 – патрубок для отвода отработанного перегретого пара

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований был разработан способ производства амидоминерального гранулированного свекловичного жома и линия для его осуществления (пат. РФ № 2674609) (рисунок 11). Данный способ позволяет повысить кормовые свойства свекловичного жома вследствие обогащения его мелассой, карбамидом и солями микроэлементов, повысить энергетическую эффективность и эксплуатационную надежность работы линии, так как предусмотрено использование парорэжекторной холодильной установки, которая в отличие от теплонасосной установки более предпочтительна с энергетической точки зрения на сахарных заводах.

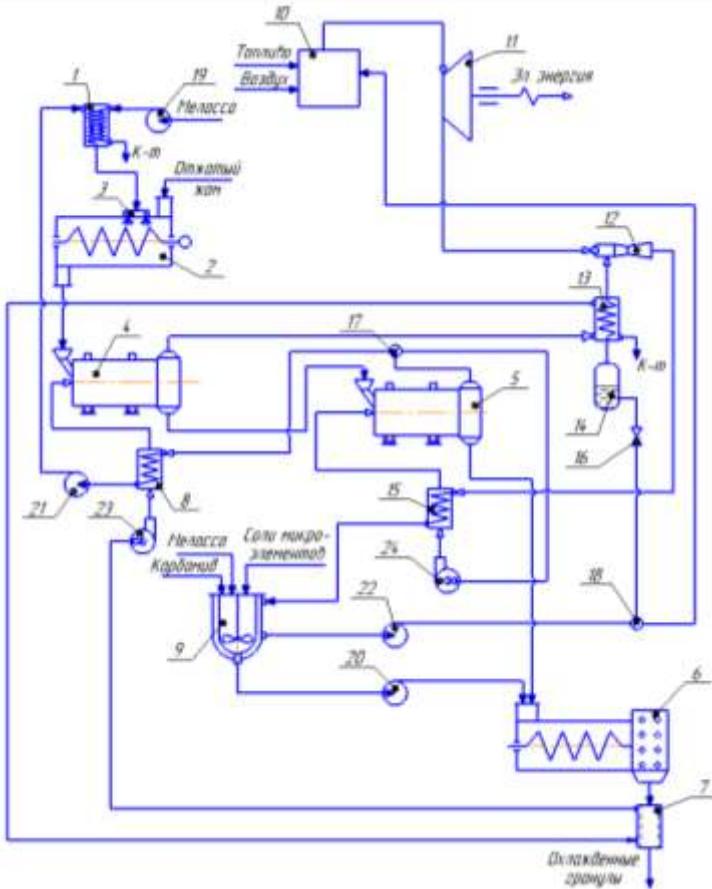


Рисунок 11 – Линия производства амидоминерального гранулированного свекловичного жома: 1 – подогреватель; 2 – смеситель; 3 – форсунки; 4, 5 – низкотемпературная и высокотемпературная сушилки; 6 – гранулятор; 7 – охладитель; 8 – теплообменник-утилизатор; 9 – мешалка-растворитель; 10 – парогенератор (котёл); 11 – турбина противодействия; 12 – эжектор; 13 – холодоприемник; 14 – испаритель; 15 – конденсатор-пароперегреватель; 16 – терморегулирующий вентиль; 17, 18 – делители потоков; 19 – насос для мелассы; 20 – насос для растворенной смеси; 21, 22 – насосы; 23, 24 – вентиляторы

Ожидаемый годовой экономический эффект от промышленного внедрения предлагаемых технологических решений и реализации продукции составит 7468,1 тыс. р. в год.

Основные выводы и результаты

1. Разработан и научно обоснован способ получения амидоминерального гранулированного свекловичного жома с вводом мелассы, карбамида и солей микроэлементов.

2. Установлены основные кинетические закономерности процесса сушки свекловичного жома в барабанной сушилке с канальными насадками с обоснованием методами математической статистики рациональных режимов проведения процесса: $T_b = 373 \dots 420 \text{ K}$; $V_b = 1,15 \dots 1,3 \text{ м}^3/\text{с}$; $q_{\text{уд}} = 8 \dots 29 \text{ кг}/\text{м}^3$; $n = 1,10 \dots 2,35 \text{ мин}^{-1}$.

3. Разработана математическая модель, описывающая распределение полей температур и влагосодержания в частице свекловичного жома прямоугольной формы при конвективной сушке, позволяющая обеспечить максимальное кинетическое соответствие двухступенчатой сушки свекловичного жома при практической реализации температурных режимов в области допустимых технологических свойств высушиваемого продукта.

4. Установлены основные кинетические закономерности процесса смешивания свекловичного жома с рецептурными компонентами с обоснованием методами математической статистики рациональных режимов проведения процесса: $n = 40 \dots 80 \text{ мин}^{-1}$; $\alpha = 0,2 \dots 0,6$; $C_m = 7,50 \dots 18,25 \%$; $\tau = 80 \dots 140 \text{ с}$.

5. Разработана конструкция барабанной сушилки с комбинированным энергоподводом (пат. РФ № 2702939), позволяющая повысить качество готового материала и интенсивность проведения процесса сушки за счет посекционной обработки жома с индивидуальным подводом сушильных агентов.

6. Разработан способ производства амидоминерального гранулированного свекловичного жома, позволяющий повысить кормовые свойства сухого свекловичного жома вследствие обогащения его мелассой, карбамидом и солями микроэлементов, а также линия для его осуствления (пат. РФ № 2674609).

7. Проведены технико-экономические расчеты, подтверждающие эффективность принятых технических и технологических решений.

8. В условиях ОАО «Елань-Коленовский сахарный завод» проведены производственные испытания по определению условий получения амидоминерального гранулированного свекловичного жома, которые подтвердили принятые рациональные режимы.

Условные обозначения

C – концентрация распределяемой влаги, кг/кг; T – температура, К;
 τ – время, с; $q\rho_0\frac{\partial C}{\partial \tau}$ – действующий в данной точке сток теплоты, Вт/м³;
 q – удельная теплота фазового превращения $q = \varepsilon r_c$; ε – критерий фазового превращения, соотношение потоков парообразной фазы;
 r_c – удельная теплота парообразования, кДж/кг; c – удельная теплоемкость продукта, кДж / (кг·К); ρ_0 – плотность высушиваемого продукта, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности сухого продукта, Вт / (м·К);
 k – коэффициент массопроводности, м²/с; δ_T – относительный коэффициент термодиффузии влажного материала, кг вл./ (кг. сух. вещ.·К).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, индексируемых в международных базах цитирования SCOPUS

1. Experimental and analytical study of the beet pulp drying process by overheated steam in active hydrodynamic conditions [Text] / Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Derkanosova A. A., Muravev A. S., **Kvasov A. V.** // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. № 12 (Special Issue 1), P. 5754-5760.

В периодических изданиях, рекомендованных ВАК

2. Распределение полей температур и влагосодержания в частице свекловичного жома прямоугольной формы при конвективной сушке / А. Н. Остриков, А. А. Шевцов, А. В. Дранников, **А. В. Квасов** // Вестник ВГУИТ. – 2018. - № 1. - С. 11-19.

3. Формирование каналов управления процессом комбинированной сушки свекловичного жома / А. В. Дранников А. А. Шевцов, **А. В. Квасов**, А. Р. Бубнов // Автоматизация. Современные технологии. – 2019. - № 2. - С. 69-73.

4. Использование теории подобия для изучения закономерностей теплообмена при сушке свекловичного жома / А. В. Дранников, **А. В. Квасов**, А. С. Полканов, Д. К. Костина // Современная наука и инновации. – 2019. - № 2. - С. 184-191.

5. Многофакторный статистический анализ процесса смешивания при получении кормовой добавки на основе свекловичного жома / А. В. Дранников, А. А. Шевцов, **А. В. Квасов**, Л. И. Лыткина, А. Р. Бубнов, С. П. Волков // Вестник ВГУИТ. – 2020. - № 1. - С. 27-33.

Статьи и материалы конференций

6. Определение физико-механических свойств свекловичного жома в условиях сушки / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, **А. В. Квасов**, А. Р. Бубнов // Материалы национальной научно-практической конференции «Наука, образование и инновации в современном мире». - Воронеж: ВГАУ, 2018. – С. 122-128.

7. Критериальные уравнения теплообмена при сушке свекловичного жома / А. В. Дранников, **А. В. Квасов**, Е. В. Костина, А. С. Полканов // Сборник научных трудов Международного научно-технического семинара «Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства». - М.: Издательство «Перо», 2018. – С. 175-178.

8. К вопросу разработки технологии амидоминерального гранулированного свекловичного жома / А. В. Дранников, **А. В. Квасов**, А. Р. Бубнов, Д. К. Костина // Материалы Международной научно-технической конференции «Инженерия техники будущего пищевых технологий». - Воронеж: ВГУИТ, 2018. – С. 277-279.

9. Особенности получения амидоминерального жома / А. В. Дранников, Е. В. Костина, **А. В. Квасов**, А. Р. Бубнов // Сборник научных статей и докладов V Международной научно-практической конференции «Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение» - Воронеж: ВГУИТ, 2018. – С. 448-449.

10. Дранников, А. В. Разработка барабанной жомосушилки с комбинированным энергоподводом / А. В. Дранников, **А. В. Квасов** // Матер. LVII отчет. науч. конф. за 2018 год: В 3 ч. Ч. 2 - Воронеж: ВГУИТ, 2019. – С.-19.

11. Дранников, А. В. Разработка двухсекционного смесителя для сыпучих кормов [Текст] / А.В. Дранников, И. С. Юрова, **А. В. Квасов** // Матер. LVIII отчет. науч. конф. за 2019 год: В 3 ч. Ч. 2 - Воронеж: ВГУИТ, 2019. – С.-21.

Патенты на изобретения РФ

12. Пат. № 2581012 РФ, F 26 В 25/22 Способ автоматического управления процессом сушки высоковлажных дисперсных материалов / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, С. В. Куцов, А. А. Дерканосова, Е. В. Костина, **А. В. Квасов** – № 2015111668/06; заявлено 01.04.2015; опубликовано 10.04.2016; Бюл. № 10.

13. Пат. № 2603225 РФ, F 26 В 17/10, F 26 В 17/26 Установка для сушки дисперсных высоковлажных материалов / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, Е. В. Костина, А. А. Дерканосова, **А. В. Квасов**, Ю. А. Питькова, А. В. Мочалова – № 2015126304/06; заявлено 02.07.2015; опубликовано 27.11.2016; Бюл. № 33.

14. Пат. № 2674609 РФ, A26K 10/30, A23K 10/37. Способ производства амидоминерального гранулированного свекловичного жома и линия для его осуществления / А. В. Дранников, А. А. Шевцов, **А. В. Квасов**, А. Р. Бубнов, Д. К. Костина – № 2017146690; заявлено 28.12.2017; опубликовано 11.12.2018; Бюл. № 35.

15. Пат. № 2702939 РФ, F26В 11/04. Барабанная сушилка / А. В. Дранников, А. А. Шевцов, С. В. Куцов, **А. В. Квасов**, А. Р. Бубнов – № 2018126027; заявлено 16.07.2018; опубликовано 14.10.2019; Бюл. № 29.

Подписано в печать 04.07.2020. Формат 60x84 1/16.

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, г. Воронеж, пр. Революции, 19

