

На правах рукописи



БОРОДОВИЦЫН АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ
СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА ПЕРЕГРЕТЫМ ПАРОМ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕКТИНА**

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 – **Алексанян Игорь Юрьевич**
доктор технических наук, профессор
(ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»), профессор

Казарцев Дмитрий Анатольевич
кандидат технических наук, доцент
(ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского»), доцент

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Майкопский государственный технологический университет», г. Майкоп

Защита состоится «11» марта 2021 г. в 11.30 на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата 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> «31» декабря 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> «18» декабря 2020 г.

Автореферат разослан «01» февраля 2021 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 сегодняшний день государственная политика в области здорового питания нацелена на сохранение и укрепление здоровья населения, развитие производства новых обогащенных, диетических и функциональных пищевых продуктов.

К функциональным продуктам относятся пектины. Они представляют собой полисахарид, который получают путем экстракции вторичных сырьевых ресурсов (свекловичного жома, яблочных, виноградных и цитрусовых выжимок, корзинок подсолнечника и т. д.). Пектины используются в качестве гелеобразователя, стабилизатора, загустителя, влагоудерживающего агента, осветлителя, а также вещества, облегчающего фильтрацию и как средство для капсулирования.

В наибольшей степени этим требованиям отвечает производство пектина и пектинопродуктов, предусматривающее выработку биологически ценного комплексо- и студнеобразователя из вторичных сырьевых ресурсов, к которым относится свекловичный жом, получаемый на сахарных заводах РФ при ежегодной переработке более 40 млн т. сахарной свеклы.

В связи с этим актуальным вопросом является использование сушки как наиболее распространенного и эффективного способа для консервирования свекловичного жома, влияющего в конечном итоге на качество и выход из него пектина. При этом необходимо отметить, что сушка должна осуществляться при таких гидродинамических и температурных режимах, которые обеспечивали бы максимальный выход пектина.

Значительный вклад в развитие теории сушки дисперсных материалов и совершенствование технологии производства пектина внесли такие ученые, как: Лыков А.В. Михайлов Ю.А., Кретов И.Т., Парфенопуло М.Г., Донченко Л.В., Хатко З.Н. 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: исследование влияния режимов сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в импульсном виброкипящем слое на выход и качество полученного из него пектина.

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

1. Анализ кинетических закономерностей процесса сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в импульсном виброкипящем слое.

2. Изучение процесса теплообмена при сушке свекловичного жома с последующим получением критериальных уравнений.

3. Выявление и обоснование рациональных режимов процесса сушки жома перегретым паром пониженного давления.

4. Математическое описание процессов тепломассообмена при сушке свекловичного жома перегретым паром пониженного давления.

5. Исследование влияния режимных параметров процесса сушки свекловичного жома на выход пектиновых веществ.

6. Анализ основных показателей качества пектина, полученного из сухого свекловичного жома.

7. Разработка способа сушки свекловичного жома перегретым паром и установки для его реализации.

8. Выполнение эксергетического анализа предлагаемого способа сушки жома как системы тепломассообменных процессов.

9. Промышленная апробация результатов предлагаемых технических и технологических решений.

Научная новизна. Научно обоснован способ получения сухого свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в виброкипящем слое.

Установлены основные кинетические закономерности процесса сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в виброкипящем слое. Разработана математическая модель, позволяющая определять не только изменение влажности и температуры частиц материала, но и параметров перегретого пара в сушильной камере.

Получены критериальные зависимости процесса теплообмена при сушке свекловичного жома в активном гидродинамическом слое, позволяющие использовать их в проектировании полупромышленных и промышленных сушильных установок при соблюдении гидродинамического, теплового подобия и с учетом масштабного перехода.

Разработана статистическая модель сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в виброкипящем слое, с помощью которой определены рациональные параметры процесса.

Использована теория эксергетического подхода к термодинамическому анализу предлагаемого способа получения сухого свекловичного жома.

Практическая ценность. Разработан способ сушки высоковлажных дисперсных материалов и установка для его осуществления (пат. РФ № 2674610), позволяющий получить готовый продукт высокого качества при высокой интенсивности проведения процесса.

Определены рациональные режимы процесса сушки свекловичного жома пониженного давления в сушилке с виброкипящим слоем: температура сушильного агента на входе в рабочую камеру – 418...428 К; давление перегретого пара в рабочей камере – 60...80 кПа; скорость сушильного агента в рабочей камере – 3,5...4,5 м/с; удельная нагрузка свекловичного жома на газораспределительную решетку – 12...16 кг/м².

Разработана установка для сушки дисперсных высоковлажных материалов (пат. РФ № 2706874), позволяющая повысить качество сухого жома и снизить удельные энергозатраты на процесс сушки за счет более полного использования теплоты сушильного агента.

Определено содержание пектина и протопектина в сухом свекловичном жоме и его комплексообразующая способность в зависимости от режимных параметров процесса сушки.

В условиях АО «АПО «Аврора» СП «Боринского сахарного завода» проведены производственные испытания по определению рациональных режимов сушки свекловичного жома, которые подтвердили эффективность предложенных технических и технологических решений.

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, научных, научно-технических и научно-практических конференциях (Воронеж, 2016-2020) (Екатеринбург, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 1 статья в издании, индексируемом в международной базе цитирования WoS, 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получено 2 патента РФ на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и результатов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков и 13 таблиц. Список литературы включает 120 наименований, в том числе 13 зарубежных. Приложения к диссертации представлены на 27 страницах.

Содержание работы

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

В первой главе представлены основные сведения о получении и применении свекловичного жома; дан краткий анализ техники и техноло-

гии сушки свекловичного жома; изложены особенности процессов тепло-массообмена при сушке материалов перегретым паром пониженного давления; приведены характеристики технологий получения и применения пектина. Сформулирована цель работы и определены задачи ее решения.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований кинетики процесса сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в импульсном виброкипящем слое. Исследования проводились на экспериментальной сушильной установке (рисунок 1).

Параметры процесса сушки в каждом опыте поддерживались постоянными в интервале значений: температура перегретого пара на входе в рабочую камеру $T_n = 393...453$ К; давление в камере $P_n = 40...100$ Кпа; скорость пара в рабочей камере $v_n = 3...5$ м/с. Начальная удельная нагрузка жома на решетку $q_{уд} = 8..24$ кг/м², начальная влажность жома $W_n^c = 216$ % по отношению к сухим веществам.

Угол наклона решетки α во всех опытах составляет 0° , а угол направления вибрации β равен 90° и тоже остается неизменным.

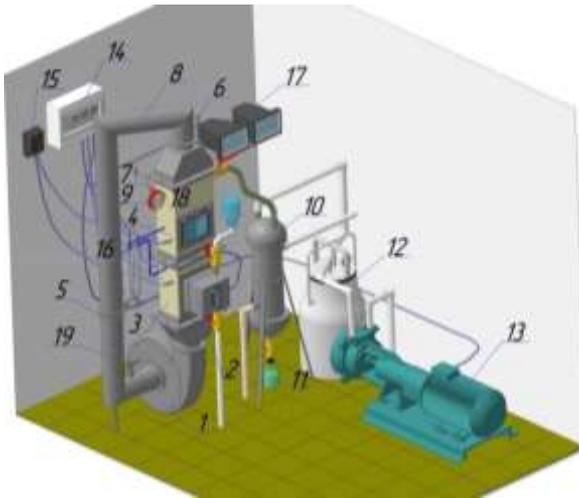


Рисунок 1 – Схема экспериментальной сушильной установки: 1 – вентилятор среднего давления СВТ-80N; 2 – парогенератор; 3 – сушильная камера; 4 – газораспределительная решетка; 5 – камерная диафрагма ДКС 0,6-80; 6 – шток; 7 – устройство для загрузки материала; 8 – рециркуляционный трубопровод; 9 – вакуумметр ТВ-6; 10 – конденсатор; 11 – сборник конденсата; 12 – ресивер; 13 – водокольцевой вакуум-насос ВВН 1-0,75; 14 – щит управления; 15 – измеритель-регулятор температуры ОВЕН 2ТРМ1; 16 – хромель-капельные термомпары; 17 – манометры типа ГНМП-52; 18 – окно разгрузки; 19 – заслонка

Характер изменения кривых соответствует периодам постоянной и убывающей скорости сушки (рисунки 2-4).

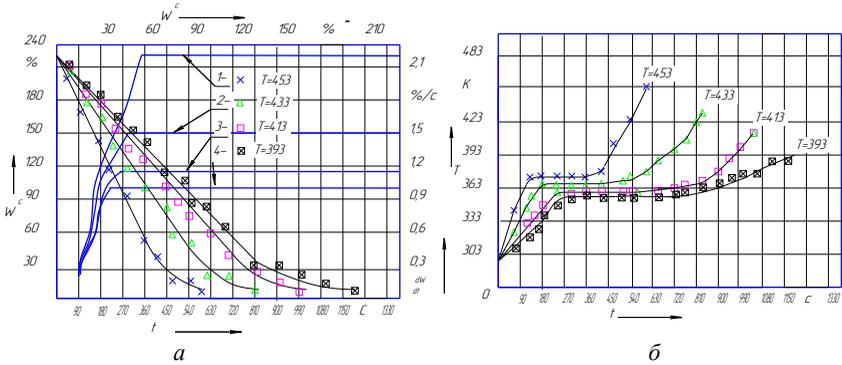


Рисунок 2 – Кинетические кривые процесса сушки свекловичного жома: а – кривые сушки $W^c = f(t)$ (1 - 4) и скорости сушки $dW^c/dt = f(W^c)$ (1 - 4) свекловичного жома при различных температурах перегретого пара; б – кривые нагрева $T_m = f(t)$ свекловичного жома при различных температурах перегретого пара, К

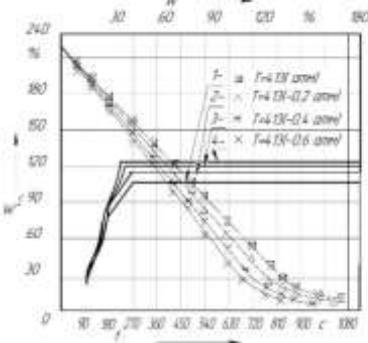


Рисунок 3 – Кривые сушки $W^c = f(t)$ (1 - 4) и скорости сушки $dW^c/dt = f(W^c)$ (1 - 4) жома при различном давлении внутри сушильной камеры, Па

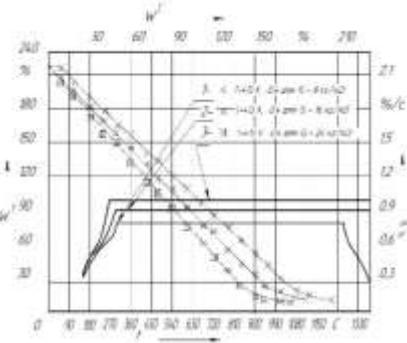


Рисунок 4 – Кривые сушки $W^c = f(t)$ (1 - 3) и скорости сушки $dW^c/dt = f(W^c)$ (1 - 3) жома при различной удельной нагрузке, кг/м²

Причем конденсации перегретого пара на поверхности частиц не наблюдается. Это можно объяснить высокими коэффициентами теплообмена и высокой начальной влажностью жома, вследствие которой уже в самый начальный момент процесса происходит испарение влаги с поверхности частиц. Увеличение температуры перегретого пара от 393 до 453

К при разряжении 60 кПа способствует возрастанию скорости сушки в первом периоде на 50 %. Больше влияние на температуру продукта, как и ожидалось, оказывает разряжение в сушильной камере. Так, снижение давления от 100 до 40 кПа позволяет снизить температуру продукта в первом периоде с 370 до 348 К, что положительно сказывается на качестве готового продукта.

Следовательно, данный способ энергоподвода позволяет сохранить достоинства сушки перегретым паром (высокие коэффициенты теплообмена, отсутствие кислорода) и снизить температуру материала для повышения его качества.

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

Для периода постоянной скорости сушки:

$$Nu = 15,3 Re^{0,28} \left(\frac{T_n}{T_m} \right)^{-0,67} \varepsilon^{1,85} \left(\frac{P_n}{P_{амм}} \right)^{-0,31}, \quad (1)$$

Для периода убывающей скорости сушки:

$$Nu = 19,6 Re^{0,2} \left(\frac{T_n}{T_m} \right)^{-0,81} \varepsilon^{1,44} \left(\frac{P_n}{P_{амм}} \right)^{-0,45} \left(\frac{W}{W_{кр1}} \right)^{0,72}. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) справедливы в следующих интервалах изменения режимных параметров: $T_n = 393 \dots 453$ К; $v_n = 3 \dots 5$ м/с; $q_{уд} = 8 \dots 24$ кг/м²; $P_n = 40 \dots 100$ кПа. Отклонение результатов, полученных по формулам (1) и (2), от экспериментальных не превышает 17,5 %. При сравнении (1) и (2) установлено, что влияние режимных параметров на теплообмен в периоде постоянной и убывающей скорости сушки практически не меняется, что соответствует кинетическим закономерностям процесса.

В третьей главе для исследования взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс сушки свекловичного жома в сушильной установке перегретым паром пониженного давления, было применено центральное композиционное ротатабельное униформ-планирование с полным факторным экспериментом ПФЭ 2⁴.

В качестве основных факторов, влияющих на процесс сушки, были выбраны: X_1 — температура перегретого пара на входе в рабочую камеру, К; X_2 — давление перегретого пара в рабочей камере, кПа; X_3 — скорость перегретого пара в рабочей камере, м/с; X_4 — удельная нагрузка свекловичного жома на газораспределительную решетку, кг/м³. 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 сушильной камеры, 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, кг/(м³·ч).

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

$$Y_1 = 2,55 + 0,25X_1 - 0,056X_2 + 0,064X_3 - 0,16X_4 + 0,099X_1^2 - 0,05X_3^2 + 0,184X_4^2 + 0,025X_1X_2 - 0,05X_1X_3 - 0,094X_1X_4 + 0,033X_2X_4 - 0,1X_3X_4 \quad (3)$$

$$Y_2 = 1,536 + 0,34X_1 - 0,04X_2 + 0,176X_3 - 0,24X_4 + 0,1457X_1^2 + 0,07X_2^2 - 0,07X_3^2 + 0,047X_1X_2 - 0,05X_1X_3 - 0,12X_1X_4 - 0,06X_3X_4 \quad (4)$$

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: $X_1 = 418...428$ К; $X_2 = 60...80$ кПа; $X_3 = 3,5...4,5$ м/с; $X_4 = 12...16$ кг/м².

Разработана математическая модель процесса сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в активном гидродинамическом режиме.

При постановке задачи моделирования были приняты следующие упрощающие допущения: 1) форма частицы продукта представлена тонкой пластиной, расположенной в плоскости (x, y), а поток теплоносителя направлен вдоль оси z ; 2) характерное время прогрева образцов определяется соотношением: $\tau_n = l^2/a$, а температура частицы продукта принимается одинаковой по всему ее объему; 3) изменение температуры перегретого пара в рабочем объеме сушилки учитывается только от одной пространственной переменной z .

Кинетическое уравнение для изменения температуры частицы T , исходя из баланса тепловой энергии:

$$Vc \frac{\partial T}{\partial \tau} = aS(T_n - T) - S\epsilon j. \quad (5)$$

Уравнение для изменения температуры пара на основе баланса тепловой энергии теплоносителя:

$$3n_{\text{п}}kT_{\text{п}} = -3n_{\text{п}}kv \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial z} - \alpha S n_{\phi} (T_{\text{п}} - T). \quad (6)$$

Подстановка равновесной концентрации молекул воды в паре $n_{\text{п}}$ в (5) с учетом (6) позволяет сформировать модель процесса сушки свекловичного жома в виде замкнутой системы дифференциальных уравнений, в которой величинами, подлежащими нахождению, являются T , $T_{\text{п}}$, j :

$$T = \frac{\alpha S}{vc} (T_{\text{п}} - T) - \frac{Suk}{vc} (n_p - n_{\text{п}}), \quad (7)$$

$$T_{\text{п}} = -v \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial z} - \frac{\alpha S n_{\phi}}{3kn_{\text{п}}} (T_{\text{п}} - T). \quad (8)$$

Для нахождения решения системы уравнений введена функция, представляющая разность температур между теплоносителем и продуктом:

$$\theta = T_{\text{п}} - T = \frac{u\chi}{\alpha} (n_p(T) - n_{\text{п}}). \quad (9)$$

Тогда система уравнений принимает вид:

$$T_{\text{п}} = T + \theta(T), \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial z} = -\frac{1}{\lambda} \theta(T). \quad (11)$$

Так как температура частиц T усреднена по времени пребывания в разных участках сушильной камеры и принимает фиксированное значение, то решение кинетического уравнения (6) имеет вид:

$$T_{\text{п}} = \bar{T} + (T_{0\text{п}} - \bar{T}) e^{-\frac{z}{\lambda}}. \quad (12)$$

Плотность тепловой энергии в единицу времени, поглощенная частицами продукта на высоте z :

$$q = \alpha n_{\phi} S (T_{\text{п}} - \bar{T}). \quad (13)$$

В результате подстановки (12) в (13) получаем:

$$q(z) = \alpha n_{\phi} S (T_{0\text{п}} - \bar{T}) e^{-\frac{z}{\lambda}}. \quad (14)$$

Интегрируя это выражение по высоте слоя продукта d , получаем уравнение для определения \bar{T} :

$$ukd(n_p(\bar{T}) - n_{\text{п}}) = \lambda \alpha (T_{0\text{п}} - \bar{T}) \left(1 - e^{-\frac{d}{\lambda}}\right). \quad (15)$$

Подставляя в (15) $n_p(\bar{T})$ из (7), получаем:

$$\frac{ukd}{\alpha \lambda} \left(n_{\text{атм}} e^{\frac{u}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{атм}}} - \frac{1}{\bar{T}} \right)} - n_{\text{п}} \right) = (T_{0\text{п}} - \bar{T}) \left(1 - e^{-\frac{d}{\lambda}}\right). \quad (16)$$

По данным эксперимента установлена линейная аппроксимация:

$$d = d_0 + d_1 v = (1 + 2v). \quad (17)$$

С учетом (16) и (17) уравнение (15) приведено к виду:

$$he \frac{u}{k T_{\text{атм}}} - \frac{u}{kT} - 1 = \frac{T_{0\text{п}} - \bar{T}}{T_*}. \quad (18)$$

Упрощая произведение Sdn_ϕ , получаем:

$$s = \frac{Sdn_\phi S_{an}}{S_{an}} = \frac{N}{S_{an}/S}. \quad (19)$$

Подставляя (12) в (19) получаем:

$$T_* = \frac{kus}{3k\nu(1-e^{-g})}; g = \frac{\alpha s}{3kn\nu}. \quad (20)$$

На рисунках 5-7 представлена графическая интерпретация моделирования.

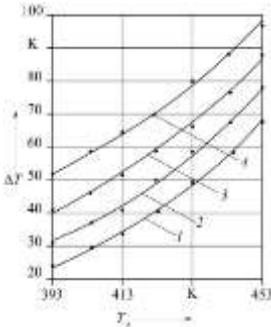


Рисунок 5 – Разность температуры материала и теплоносителя ΔT при различных давлении P , кПа: 1 – удельных нагрузках $q_{уд}$, 100; 2 – 80; 3 – 60; 4 – 40

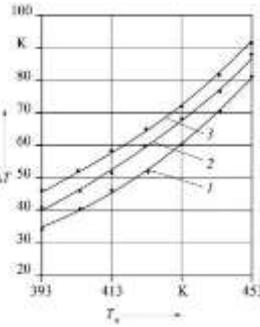


Рисунок 6 – Разность температуры материала и теплоносителя ΔT при различных нагрузках $q_{уд}$, kg/m^2 : 1 – 8; 2 – 16; 3 – 24

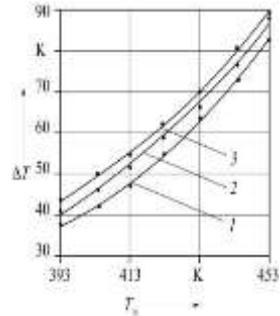


Рисунок 7- Разность температуры материала и теплоносителя ΔT при различной скорости пара v_n , м/с: 1 – 5; 2 – 4; 3 – 3

Обеспечена достаточная сходимость результатов, при которой отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышало по абсолютному значению 12,5 %.

В четвертой главе представлено исследование влияния режимных параметров процесса сушки свекловичного жома на выход пектиновых веществ. Результаты исследований содержания пектиновых веществ в жоме, высушенном при различных параметрах процесса, показаны на рисунках 8, 9.

Наибольшее содержание пектина и протопектина в образце, высушенном при температуре перегретого пара 373 К и разрежении в сушильной камере 70 кПа. Причем содержание протопектина данного образца превышает содержание образца с наименьшим содержанием в 1,16 раз. А содержание пектина – в 2,54 раза.

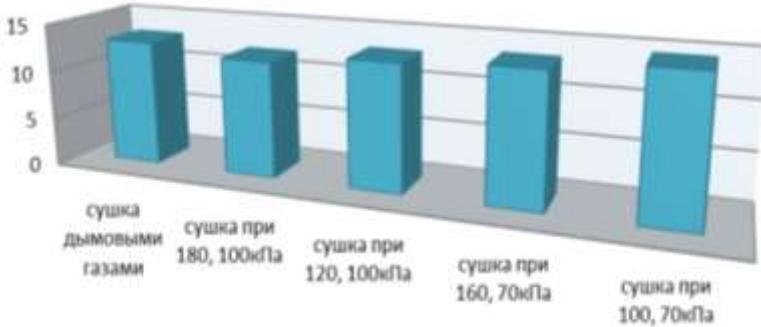


Рисунок 8 – Содержание протопектина в свекловичном жоме, %

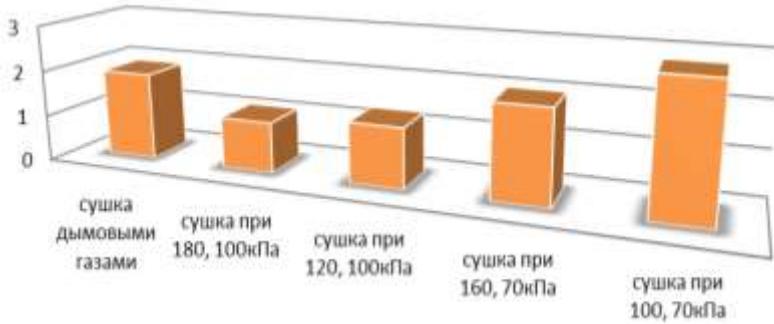


Рисунок 9 – Содержание пектина в свекловичном жоме, %

Учитывая огромную производительность современных сахарных заводов, это колоссальная разница. Это разница объясняется тем, что молекулы пектина и протопектина при высокой температуре подвержены разрушению. Но, как оказалось, перегретый пар благоприятно действует не только на процесс сушки, но и на содержание пектиновых веществ. Это объясняется тем, что пар является более «мягким» теплоносителем, нежели горячий воздух. И он оказывает меньшее разрушающее воздействие на молекулы пектиновых веществ.

Установлено, что в образцах, высушенных дымовыми газами, содержание пектиновых веществ уступает образцам, высушенным под разрежением, но незначительно превосходит их содержание в жоме, высушенном при атмосферном давлении. На содержание пектиновых веществ

разряжение совместно с перегретым паром оказывает лучшее воздействие, чем дымовые газы. Внешний вид высушенного жома свидетельствует о преимуществе предлагаемого способа сушки.

На рисунке 10 представлена гистограмма комплексообразующей способности пектина по солям меди. Комплексообразующая способность образца высушенного при 393 К и 70 кПа выше в 1,37 раз образца жома, высушенного при 453 К и 100 кПа.

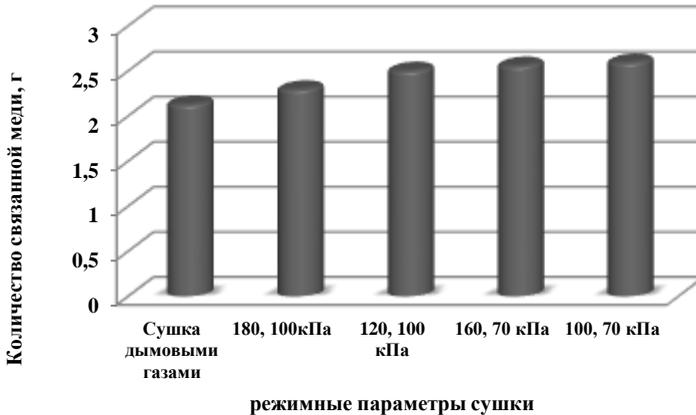


Рисунок 10 – Комплексообразующая способность пектина из свекловичного жома

Некоторая часть карбоксильных групп пектинов в свекловичном жоме присоединяет к себе диссоциированные ионы минеральных веществ, присутствующих в продукте. В процессе кислотной экстракции при высокой температуре эти ионы отрываются от карбоксильных групп и переходят в экстракт. Соответственно карбоксильная группа оказывается свободной и может в дальнейшем присоединить ион меди.

При сушке перегретым паром на комплексообразующую способность оказывают влияние режимные параметры, то есть чем режим сушки мягче, тем выше его комплексообразующая способность.

Сравнение комплексообразующей способности пектинов, полученных из различного сырья (рисунок 11), показало, что наиболее ярко комплексообразующей способностью обладает свекловичный пектин. Он превышает по этому показателю яблочный в 1,12 раза, а цитрусовый – в 1,33 раза.

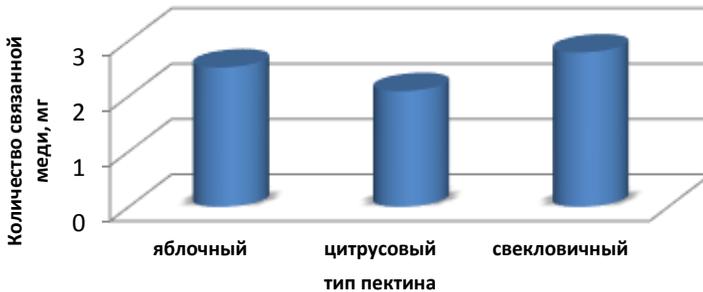


Рисунок 11 – Сравнительная гистограмма комплексообразующей способности пектина из различного сырья

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований был разработан способ сушки жома перегретым паром пониженного давления и установка для его реализации (патент РФ № 2674610) (рисунок 12).

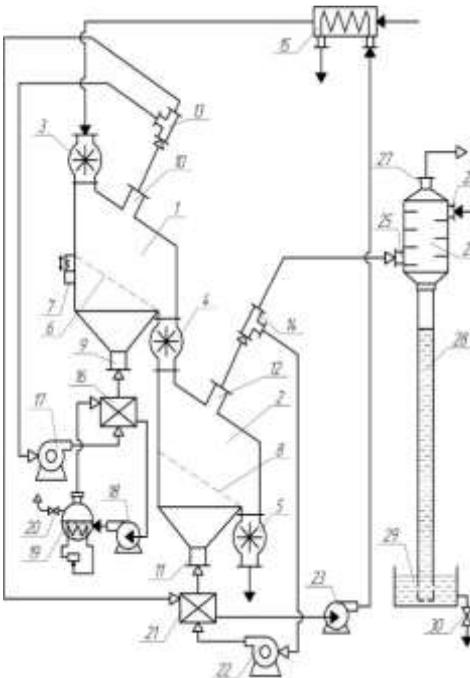


Рисунок 12 – Схема установки для реализации способа сушки: 1, 2 – камера перегретым паром атмосферного и пониженного давления; 3, 4, 5 – шлюзовый затвор; 6, 8 – наклонная решетка; 7 – вибропривод; 9 - 12 – патрубки подвода и отвода отработанного перегретого пара; 13, 14 – делитель потока отработанного перегретого пара; 15 – подогреватель материала; 16, 21 – пароперегреватель пара атмосферного и пониженного давления; 17, 22 – вентиляторы; 18 – насос для конденсата; 19 – парогенератор; 20 – предохранительный клапан; 23 – насос; 24 – конденсатор; 25 – патрубок подвода отработанного перегретого пара пониженного давления; 26 – патрубок подвода холодной воды; 27 – патрубок отвода несконденсировавшихся газов; 28 – барометрическая труба; 29 – сборник конденсата; 30 – вентиль для сброса конденсата

Разработана оригинальная конструкция установки для сушки дисперсных высоковлажных материалов (патент РФ № 2706874) (рисунок 13), позволяющая повысить качество готового материала, уменьшить удельные энергозатраты на процесс сушки и снизить потери теплоты в окружающую среду.

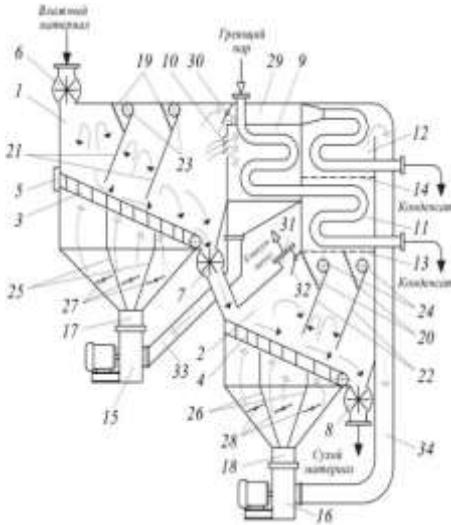


Рисунок 13 – Конструкция установки для сушки дисперсных высоковлажных материалов: 1, 2 - герметичная камера виброкипящего и кипящего слоя; 3, 4 - наклонные решетки; 5 – вибропривод; 6, 7, 8 - шлюзовые затворы; 9 - пароперегреватель пара атмосферного давления; 10 – жалюзи; 11, 12 - пароперегреватель пара пониженного давления; 13, 14 - перфорированные перегородки; 15, 16 – вентиляторы; 17, 18 - патрубки подвода перегретого пара; 19, 20 – пружины; 21, 22 - наклонные вставки; 23, 24 – шарниры; 25, 26 - делители потока пара на зоны; 27, 28 - регулирующие заслонки; 29 – короб; 30 - регулирующая заслонка; 31 - патрубок отвода отработанного перегретого пара пониженного давления; 32 – шибер; 33, 34 - рециркуляционный короб

Выполнен эксергетический анализ и проведена оценка термодинамического совершенства процесса сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления, предусматривающего использование барометрического конденсатора для создания разряжения в сушилке. Эксергия потоков и эксергетические потери составили эксергетический баланс процесса сушки, представленный диаграммой Грассмана-Шаргута (рисунок 14).

Полученный эксергетический КПД равен 8,1 %, что на 3,2 % выше, чем при использовании традиционного способа сушки. Повышение степени термодинамического совершенства системы достигается за счет использования следующих технологических приёмов: - предусмотрено использование не только основного продукта, но и конденсата, получаемого в контрольных поверхностях I и VII, для сторонних технологических процессов на предприятии; - в технологии максимально использован энергетический потенциал теплоносителей, и отходом являются

только низкоэнергетические неконденсируемые газы; - предусмотрена рециркуляция теплоносителей; - для получения перегретого пара на второй ступени сушки используется разрежение, что позволяет применять для перегрева пара отработанный перегретый пар с первой ступени сушки, что исключает потребность в дополнительном количестве греющего пара и снижает потребляемую мощность ТЭНа; - получение разрежения для снижения температуры перегрева пара осуществляется без использования дополнительного оборудования, а только лишь за счёт теплообмена с холодной водой (которая затем не выбрасывается в окружающую среду, а служит побочным продуктом).

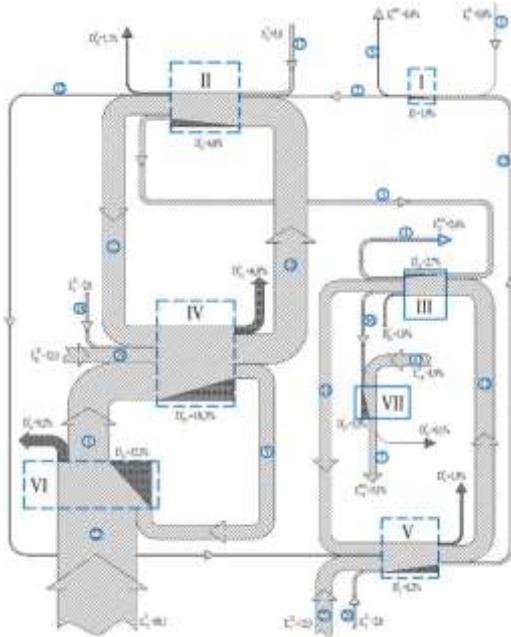


Рисунок 14 – Эксергетическая диаграмма способа сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления. Контрольные поверхности: I – подогреватель; II – сушилка под атмосферным давлением; III – сушилка под разрежением; IV – пароперегреватель атмосферного давления; V – пароперегреватель пониженного давления; VI – парогенератор; VII – барометрический конденсатор

В условиях АО «АПО «Аврора» СП «Боринского сахарного завода» проведены производственные испытания по определению рациональных режимов сушки свекловичного жома перегретым паром, которые подтвердили эффективность предложенных технических и технологических решений.

Основные выводы и результаты

1. Установлены основные кинетические закономерности процесса сушки жома перегретым паром пониженного давления в импульсном вибро-кипящем слое с обоснованием рациональных режимов проведения процесса: $T_n = 418 \dots 428$ К; $P_n = 60 \dots 80$ кПа; $v_n = 3,5 \dots 4,5$ м/с; $q_{уд} = 12 \dots 16$ кг/м².

2. Выявлено влияние режимных параметров процесса сушки на коэффициент теплообмена и получены критериальные уравнения, описывающие процесс теплообмена при сушке свекловичного жома перегретым паром в периоде постоянной и убывающей скорости сушки.

3. Разработана математическая модель, позволяющая определять не только изменение влажности и температуры частиц материала, но и параметры перегретого пара в сушильной камере с возможностью максимального использования теплоты отработанного теплоносителя.

4. Анализ влияния режимных параметров процесса сушки свекловичного жома на выход и качество пектиновых веществ показал, что жом, высушенный при температуре перегретого пара 373 К и разряжении в сушильной камере 70 кПа, содержит в 2,5 раза больше пектиновых веществ и имеет в 1,37 раза выше комплексообразующую способность пектина, чем жом, высушенный при 453 К и атмосферном давлении.

5. Разработана сушильная установка с комбинированным энергоподводом (пат. РФ № 2706874), позволяющая реализовать способ сушки свекловичного жома (патент РФ № 2674610) при пониженном давлении перегретого пара и получать качественный продукт без снижения интенсивности проведения процесса.

6. Проведен эксергетический анализ способа сушки жома перегретым паром пониженного давления. Эксергетический КПД равен 8,1 %, что выше, чем при использовании традиционного способа сушки на 3,2 %.

7. В условиях «Боринского сахарного завода» проведены производственные испытания по определению рациональных режимов сушки свекловичного жома, которые подтвердили эффективность предложенных технических и технологических решений.

Условные обозначения

W^c – влажность материала в пересчете на сухое вещество, %; T – температура, К; P_n – давление перегретого пара, Па; v_n – скорость перегретого пара, м/с; $q_{уд}$ – удельная нагрузка материала на решетку, кг/м²; τ – время, с; Nu – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса; ε – порозность слоя; x, y, z – текущие координаты, м; l – толщина пластины материала,

m ; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; j – удельный поток влаги, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; V – объем одной частицы продукта, м^3 ; S – площадь частицы продукта, м^2 ; S_{an} – площадь сечения камеры сушильного аппарата, м^2 ; n_n – концентрация молекул воды, $1/\text{м}^3$; k – постоянная Больцмана, $\text{Дж}/\text{К}$; α – коэффициент теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; d – толщина слоя материала, м ; N – количество частиц материала в сушильной камере, шт.

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

**В изданиях, индексируемых в международных базах цитирования
Web of Science**

1. Preparation and application of fodder vitamin additive choline chloride B₄ on the basis of dried beet pulp in premix composition / A. A. Shevtsov, A. V. Drannikov, A. A. Derkanosova, **A. M. Borodovitsyn**, I. V. Glebova, A. G. Gurin // International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences. – 2017. № 6(1), P. 217-226.

В периодических изданиях, рекомендованных ВАК

2. Управление процессом сушки высоковлажных дисперсных материалов при пониженном давлении сушильного агента / А. В. Дранников, Е. В. Костина, А. А. Дерканосова, **А. М. Бородовицын** // Автоматизация. Современные технологии. – 2017. - № 6. - С. 248 – 253.

3. Кинетика влагоудаления и определение продолжительности процесса сушки высоковлажных дисперсных материалов / А. В. Дранников, Е. В. Костина, **А. М. Бородовицын**, М. В. Полухин, А. С. Полканов // Известия вузов. Пищевая технология. – 2017. - № 2-3. - С. 78 – 82.

4. Моделирование теплообмена при сушке свекловичного жома перегретым паром пониженного давления / А. В. Дранников, А. А. Шевцов, Е. В. Костина, **А. М. Бородовицын** // Известия вузов. Пищевая технология. – 2018. - № 2-3. - С. 84 – 89.

5. Влияние режимов сушки свекловичного жома на выход пектина / А. В. Дранников, С. А. Титов, А. А. Дерканосова, А. С. Полканов, **А. М. Бородовицын** // Пищевая промышленность. – 2019. - № 2. - С. 49 – 51.

Статьи и материалы конференций

6. Математическое моделирование процесса сушки высоковлажных дисперсных материалов в среде перегретого пара / А. В. Дранников, Е. В. Костина, **А. М. Бородовицын**, М. В. Полухин // Материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения М. Х. Кишиневского «Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств» - Воронеж: ВГУИТ, 2016. – С. 349-354.

7. Дранников, А. В. Способ сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления и установка для его осуществления / А. В. Дранников, Е. В. Костина, **А. М. Бородовицын** // Матер. LV отчет. науч. конф. за 2016 год: В 3 ч. Ч. 2, - Воронеж: ВГУИТ, 2017. – С. 33.

8. Разработка установки для сушки высоковлажного сырья при производстве пектина / А. В. Дранников, Е. В. Костина, **А. М. Бородовицын**, М.В. Полухин // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пищевой промышленности и общественного питания». - Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. экон. ун-та, 2017. – С. 72 - 74.

9. Обоснование способа сушки сырья при производстве пектина / А. В. Дранников, **А. М. Бородовицын**, А. С. Полканов, Д. К. Костина // Сборник научных статей и докладов III Международной научно-практической конференции «Инновационные решения при производстве продуктов питания из растительного сырья». - Воронеж: ВГУИТ, 2017. – С. 192 - 193.

10. Дранников, А. В. Кинетические закономерности процесса сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления / А. В. Дранников, **А. М. Бородовицын** // Матер. LVI отчет. науч. конф. за 2017 год: В 3 ч. Ч. 2, - Воронеж: ВГУИТ, 2018. – С. 17.

11. Дранников, А.В. Изучение влияния параметров процесса сушки свекловичного жома на выход пектиновых веществ / А. В. Дранников, **А. М. Бородовицын** //Матер. LVII отчет. науч. конф. за 2018 год: В 3 ч. Ч. 2, - Воронеж: ВГУИТ, 2019. – С. 18.

12. Дранников, А.В. Решение задач энергоэффективности процесса сушки свекловичного жома методами математического моделирования / А. В. Дранников, К. В. Харченков, **А. М. Бородовицын** //Матер. LVIII отчет. науч. конф. за 2019 год: В 3 ч. Ч. 2, - Воронеж: ВГУИТ, 2020. – С. 20.

13. **Бородовицын, А.М.** Эксергетический анализ процесса сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления / **А. М. Бородовицын**, А. В. Дранников // Материалы Международной научно-технической онлайн-конференции «Инженерия перспективного продовольственного машиностроения на основе современных технологий». - Воронеж: ВГУИТ, 2020. – С. 81 - 82.

Патенты на изобретения РФ

14. Пат. № 2674610 РФ, А23L 3/40 Способ сушки высоковлажных дисперсных материалов и установка для его осуществления / Дранников А. В., Шевцов А. А., Костина Е. В., Дерканосова А. А., **Бородовицын А. М.**, Полканов А. С. – № 2017140289; заявлено 21.11.2017; опубликовано 11.12.2018; Бюл. № 35.

15. Пат. № 2706874 РФ, F26B 17/26, F26B 17/10 Установка для сушки дисперсных высоковлажных материалов / Дранников А. В., Юрова И. С., **Бородовицын А. М.**, Ярушкина Д. Е., Беломыльцева Д. В. – № 2017146962; заявлено 29.12.2017; опубликовано 21.11.2019; Бюл. № 33.

Подписано в печать 30.12.2020 г. 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

