

На правах рукописи



**ТЕЛИЧКИН Роман Сергеевич**

**РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА  
РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ ЭКСТРАКТА ЗЕЛЕННОГО ЧАЯ**

Специальность 05.18.12– Процессы и аппараты пищевых производств

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Астрахань - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»).

- Научный руководитель – доктор технических наук, доцент  
**Максименко Юрий Александрович**  
(ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»)
- Официальные оппоненты – **Косачев Вячеслав Степанович**  
доктор технических наук, профессор  
(ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»), профессор  
кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения  
**Казарцев Дмитрий Анатольевич**  
кандидат технических наук, доцент  
(ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)»), доцент кафедры  
биотехнологии переработки мясного и молочного сырья
- Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово

Защита состоится «18» февраля 2021 года в 10 часов 00 мин 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.

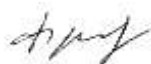
Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета университета.

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> «08» 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> «09» ноября 2020 г.

Автореферат разослан «12» января 2021 г.

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



Л.Н. Фролова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** Пищевая и перерабатывающая промышленность наряду с рядом других отраслей формирует продовольственную и экономическую безопасность Российской Федерации. Активное использование экстрактов обусловлено тем, что помимо уникальных собственных характеристик, экстракты могут применяться как элемент, который усиливает действие того или иного компонента в составе продукции. В пищевой промышленности экстракты растений преимущественно используются в качестве функциональных добавок, основ для приготовления различных напитков и в виде специй.

Постоянный спрос на сырье растительного происхождения, интерес к фитохимическим пищевым компонентам, а также стремительное развитие рынка пищевых биологически активных добавок обуславливает необходимость рационального использования растительного сырья и налаживания производств, реализующих энергоэффективные технологии переработки. Применение экстрактов на практике в качестве ингредиентов в виде сухой порошковой формы рационально и упрощает процессы хранения, транспортировки, дозирования на пищевых производствах. Актуальным направлением применения сухих экстрактов является производство различных тонизирующих напитков, чайных и кофейных смесей. Зеленый чай является популярным продуктом, а сухая порошковая форма экстракта зеленого чая перспективна для промышленного производства и использования в пищевой промышленности, фармацевтике и косметологии.

Значимый вклад в создание и развитие теории и техники сушки внесли ученые А.С. Гинзбург, А.В. Лыков, М.В. Лыков, В.И. Муштаев, П.А. Ребиндер, Б.С. Сажин, И.А. Рогов, Ю.М. Плаксин, С.П. Рудобашта, П.Г. Романков, В.И. Попов, А.Н. Остриков, И.Т. Кретов, С.Т. Антипов, И.Ю. Алехсанян, К.Г. Филоненко, Б.И. Леончик, М.А. Гришин, О. Кришер и многие другие.

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, посвящена разработке способа распылительной сушки экстракта зеленого чая за счет изучения и анализа физико-химических свойств экстракта, моделирования и анализа процессов тепломассообмена, разработки рационального режима обезвоживания и конструкции сушильной установки. Исследования выполнялись в соответствии с тематическим планом НИОКР в рамках государственного задания и согласно координационному плану научно-исследовательской работы кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».

**Цель диссертационной работы** – разработка способа распылительной сушки экстракта зеленого чая за счет изучения и анализа физико-химических свойств экстракта, моделирования и анализа процессов тепломассообмена, разработки рационального режима обезвоживания и конструкции сушильной установки.

**Для достижения цели решались следующие основные задачи:**

1) Систематизировать данные литературных источников, экспериментально установить и проанализировать функциональные зависимости для расчета теплофизических, структурно-механических и гигроскопических характеристик экстракта зеленого чая в реальных диапазонах изменения его влажности и температуры в процессе сушки.

2) Проанализировать влияние температуры и влажности материала на теплофизические, структурно–механические и гигроскопические характеристики концентратов экстракта зеленого чая.

3) Исследовать механизм взаимодействия концентратов экстракта зеленого чая с водой, дать характеристику экстракту как объекту сушки и оценить виды и энергию связи влаги с экстрактом в увязке с процессом обезвоживания. 4) Оценить эффективность использования тепловой энергии с учетом термодинамических потерь тепла в процессе обезвоживания и проанализировать фазовые превращения при внутреннем тепломассопереносе в процессе сушки экстракта зеленого чая.

5) Исследовать кинетические закономерности и механизм тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая.

6) Реализовать математическую постановку и решить задачу рационализации сушильного процесса при распылительной сушке экстракта зеленого чая. Установить рациональный режим распылительной сушки экстракта зеленого чая.

7) Реализовать математическую модель внутреннего тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая.

8) Разработать конструкторские решения для организации эффективной сушки при производстве экстракта зеленого чая.

9) Разработать рекомендации по практическому использованию результатов научных исследований и проектно-технических решений. Апробировать, протестировать и внедрить основные результаты на предприятиях отрасли.

**Научная новизна.** Установлены и проанализированы функциональные зависимости для расчета структурно–механических, теплофизических и гигроскопических характеристик концентратов экстракта зеленого чая. Установлено и проанализировано влияние влажности концентратов экстракта зеленого чая и их температуры на структурно–механические, теплофизические и гигроскопические характеристики концентратов экстракта зеленого чая. Исследованы сорбционные явления при контакте концентратов экстракта зеленого чая с водой и установлены соответствующие математические зависимости для оценки видов и энергий связи влаги с сухими веществами экстракта. Исследованы кинетические закономерности тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая. Проанализированы внутренний тепломассоперенос и фазовые превращения в процессе сушки экстракта зеленого чая. Реализована математическая модель внутреннего тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая с учетом свойств материала, технологических, термодинамических параметров процесса и кинетических закономерностей влагоудаления.

**Практическая значимость.** Исследована эффективность расхода тепловой энергии, затрачиваемой на высушивание экстракта зеленого чая с учетом термодинамических потерь тепла. В ходе комплекса теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что эффективное обезвоживание водного экстракта зеленого чая с начальной влажностью 0,9 кг/кг при котором достигается удельная производительность по сухому порошку экстракта 0,937..1,528 кг/(м<sup>3</sup>·ч) и удельная влагонапряженность рабочего объема сушильной камеры 7,962..12,985 кг/(м<sup>3</sup>·ч) надлежит реализовывать при распылительном способе и следующих условиях:

- Начальная (исходная) температура водного экстракта зеленого чая 293..318 К;
- Начальная (исходная) температура нагретого воздуха – сушильного агента 443..503 К;
- Конечная температура отработавшего сушильного агента 343..353 К;
- Способ подачи экстракта зеленого чая в сушильную камеру – распыление.
- Способ распыления – акустический, механический и др.
- Начальный (исходный) диаметр распыленных частиц экстракта зеленого чая 20..30 мкм;
- Средний характерный размер частиц сухого экстракта зеленого чая – порошка 1..6 мкм.
- Расход сушильного агента на 1 кг испаренной влаги 20кг/кг.
- Параметры воздуха рабочей зоны производственного помещения перед нагревом и подводом в сушильную камеру (ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны и СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений): температура 285..303К; влажность воздуха составляет 40..75%.

Разработана конструкция сушильной установки и получен патент на полезную модель 191126 РФ для практического внедрения.

Разработаны и апробированы в промышленности рекомендации по практическому использованию результатов проектно-технических решений и научных исследований.

ООО «БИОПОЛИМЕР-НЕО», АО «ОРЕЛПРОДУКТ», ООО «Инновационные технологии продуктов питания» ООО «ЭЛЕКТРОН» и Ассоциация Астраханских рестораторов и кулинаров внедрили и используют результаты и рекомендации диссертационной работы.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- результаты экспериментально-аналитических исследований теплофизических, структурно–механических и гигроскопических характеристик концентратов экстракта зеленого чая;
- результаты экспериментально-аналитических исследований механизма тепломассопереноса и кинетических закономерностей процесса распылительной сушки экстракта зеленого чая;
- результаты математического моделирования внутреннего тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая;
- конструктивные особенности установки распылительной сушки.

**Апробация результатов.** Материалы и отдельные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались 61-ой, 62-ой, 63-ей, 64-ой Международных научных конференциях научно-педагогических работников Астраханского государственного технического университета (Астрахань, 2017-2020гг.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 5 статей в журналах рекомендованных ВАК РФ, получен 1 патент РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов и заключения, списка литературы и приложений. Основное

содержание работы изложено на 187 страницах машинописного текста, содержит 29 таблиц, 57 рисунков, список литературы из 243 наименований работ отечественных и зарубежных авторов. Приложения на 28 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность исследований. Поставлена цель и сформулированы задачи диссертационной работы.

**В первой главе** дана общая характеристика растительным экстрактам, в том числе экстракта зеленого чая. Проанализированы перспективы производства, рынок и области использования растительных экстрактов. Проанализированы современные технологии переработки растительного сырья, способы и конструкторские решения для сушки растительных экстрактов. Предложена проблемно - концептуальная схема исследований.

**Во второй главе** изложены результаты анализа статистики процесса обезвоживания, гигроскопических и теплофизических свойств концентратов экстракта зеленого чая как объекта сушки.

Получены зависимости плотности  $\rho$ , удельной теплоемкости  $c$ , коэффициента температуропроводности  $a$  и коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от температуры и влажности растительных экстрактов.

Для исключения потери качества высушиваемого материала, его температура не должна превышать  $T = 55..60^\circ\text{C}$ . Верхний предел варьирования  $T = 333\text{K}$ . Нижний предел  $T = 293\text{K}$ , соответствует температуре хранения водных растительных экстрактов, в том числе экстракта зеленого чая. Диапазон варьирования влажности  $W = 0,9..0,05 \text{ кг/кг}$  соответствует реальному изменению  $W$  в процессе обезвоживания.

Зависимость плотности  $\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$  от  $W$  концентратов из экстракта зеленого чая:

$$\rho(W) = 10^4 / (2,0834074 \cdot W + 7,934625) \quad (1)$$

Зависимость удельной теплоемкости  $c(W)$ ,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$  имеет вид:

$$c(W) = 2100 \cdot W + 2082 \quad (2)$$

Функциональная зависимость теплопроводности  $\lambda$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$  экстракта:

$$\lambda(W, T) = (a_z \cdot \dot{O}^2 + b_z \cdot \dot{O} + c_z) \cdot W^2 + (d_z \cdot \dot{O}^2 + e_z \cdot \dot{O} + f_z) \cdot W + (g_z \cdot \dot{O}^2 + k_z \cdot \dot{O} + l_z) \quad (3)$$

где  $a_z, b_z, c_z, d_z, e_z, f_z, g_z, k_z, l_z$  – эмпирические коэффициенты.

Для определения коэффициента температуропроводности  $a$  применима известная зависимость:

$$a(W, T) = \lambda(W, T) / (c(W) \cdot \rho(W)) \quad (4)$$

Систематизация и обобщение данных по теплофизическим характеристикам выполнялись для дальнейшего использования в инженерной практике, а также для научного анализа кинетики и динамики тепломассообменных процессов, их моделирования и оптимизации с целью энерго- и ресурсосбережения.

Исследовались гигроскопические свойства водного экстракта зеленого чая тензометрическим методом Ван-Бамелена. На основе результатов экспериментов для анализа построены изотермы сорбции (например, при  $T = 293 \text{ K}$  на рисунке 1). Характер изотерм свидетельствует о сложном механизме влагопоглощения.

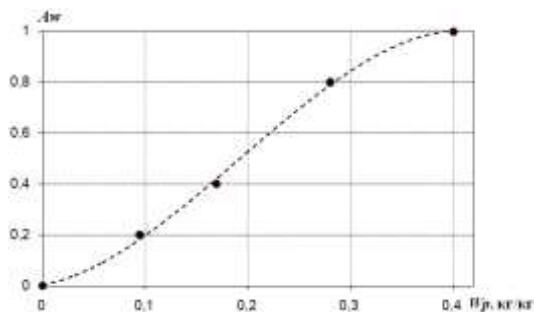


Рисунок 1 – Изотерма сорбции водяного пара экстрактом зеленого чая

Наличие точек перегиба указывает на изменение механизма сорбции. Материал по своим коллоидно-физическим свойствам относится к группе капиллярно-пористых коллоидных тел, в которых для жидкости характерны различные формы связи влаги с твердым скелетом, присущие как капиллярно-пористым, так и коллоидным телам.

На изотермах можно выделить три участка, характеризующих влагу мономолекулярной адсорбции, влагу полимолекулярной адсорбции и жидкость в объеме микро- и макрокапилляров, пор и др.

Максимальную влажность материала при активности воды  $Aw = 1$ , принято называть гигроскопической влажностью  $Wg$ , кг/кг, которая является границей гигроскопической области материала. В таблице 1 приведены значения  $Wg^1$ , кг/кг при  $T = 293$  К и  $Wg^2$ , кг/кг при  $T = 333$  К для исследуемого продукта. Содержание адсорбционно-связанной влаги мономолекулярного слоя продукта  $Wк$ , кг/кг (таблица 1) установлено по точке, отсекаемой на оси абсцисс прямой, являющейся продолжением прямолинейного участка изотермы. В ходе изучения процесса сорбции водяного пара, а также на основе результатов исследований ряда авторов установлено, при  $Aw \approx 0,7..0,8$  наблюдается перегиб изотермы в соответствующей точке при  $Wε$ , кг/кг. Равновесная влажность  $Wε$ , кг/кг характеризует границу между влагой, удерживаемой в продукте за счет сил адсорбции и жидкостью заключенной в объеме микро- и макрокапилляров, пор, а также иммобилизационной и осмотической влаги. В таблице 1 приведены значения влажности  $Wε^1$ , кг/кг при  $T = 293$  К и  $Wε^2$ , кг/кг при  $T = 333$  К для экстракта зеленого чая.

Таблица 1 – Гигроскопические характеристики экстракта

| $Wк$ , кг/кг | $Wg^1$ , кг/кг | $Wg^2$ , кг/кг | $Wε^1$ , кг/кг | $Wε^2$ , кг/кг |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0,05         | 0,4003         | 0,3680         | 0,2803         | 0,272          |

Таким образом, установлены гигроскопические характеристики для исследуемых продуктов, которые позволяют определить общее количество влаги, удаляемой при сушке и классифицировать эту влагу в продукте в увязке с процессом ее удаления.

Для математического описания процесса сорбции паров влаги получена функциональная зависимость активности воды  $Aw$  от  $Wp$ , кг/кг и  $T$ , К:

$$Aw(Wp, T) = (a \cdot T + b) \cdot Wp^3 + (c \cdot T + d) \cdot Wp^2 + (e \cdot T + f) \cdot Wp + (g \cdot T + h) \quad (5),$$

где  $a, b, c, d, e, f, g, h$  – эмпирические коэффициенты.

Дополнительно, с учетом высокой гигроскопичности порошка сухого порошка экстракта зеленого чая, выполнены исследования по оценке кинетики влагопоглощения для последующего расчета продолжительности заключительных

операций (упаковка, дозирование и т.д.). Процессы влагопоглощения зависят от условий (климатических и производственных).

За целевую функцию была принята текущая в процессе сорбции влажность материала  $W$ , которая увеличивается от 0,04 кг/кг до 0,06 кг/кг (0,05 кг/кг рекомендована для длительного хранения) в течении процесса сорбции  $\tau_v$ , мин. Влияющие факторы: температура продукта  $T_{prod}$ , температура воздуха  $T_a$ , и относительная влажность  $\phi_a$  воздуха в производственном помещении. Эксперименты проведены эксикаторным методом при наиболее благоприятных для явлений сорбции условиях:  $T_a = 12^\circ\text{C} = 275\text{K}$  и  $\phi_a = 75\% = 0,75$ . Получена графическая кинетическая зависимость (рисунок 2).

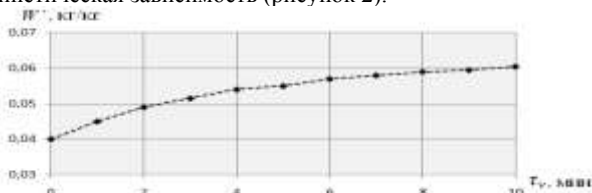


Рисунок 2 – Кинетика влагопоглощения сухим экстрактом зеленого чая

Установлена математическая кинетическая зависимость:

$$W(\tau_v) = 0,00002 \cdot \tau_v^3 - 0,00055 \cdot \tau_v^2 + 0,00526 \cdot \tau_v + 0,04016 \quad (6)$$

Наблюдая за поведением материала в процессе поглощения воды можно сделать вывод о том, что из-за высокой гигроскопичности тонкодисперсного порошка его частицы склонны к аутогезии ( $\phi_a = 75\%$ ) с комкованием, вследствие чего целесообразно обеспечение герметичности накопительных емкостей, транспортных, дозирующих элементов и узлов смешения. Для обеспечения рационального срока хранения продукцию необходимо герметично упаковывать или хранить в складских помещениях с заданной влажностью воздуха. Зависимость (6) позволяет рассчитать допустимые временные интервалы для негерметичного осуществления технологических процессов, транспортирования, сфасовки и упаковывания.

Движущей силой сорбции является разность химических потенциалов  $\Delta\mu$ , которая в гигроскопической области равна энергии связи влаги с материалом  $R \cdot T \cdot \ln A_w$  (где  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная), которую принимаем потенциалом влагопереноса:

$$E\ddot{a}\ddot{a} = -\Delta\mu = -R \cdot T \cdot \ln((a \cdot T + b) \cdot W_p^3 + (c \cdot T + d) \cdot W_p^2 + (e \cdot T + f) \cdot W_p + (g \cdot T + h)) \quad (5)$$

Изменение свободной энергии определим путем дифференцирования уравнения Гиббса-Гельмгольца по  $W_p$  при  $T = const$  ( $\Delta F = \Delta E - T \cdot \Delta S$ , где  $\Delta E$  – изменение внутренней энергии;  $T \cdot \Delta S$  – изменение связанной энергии;  $\Delta S$  – изменение энтропии):  $(\partial \Delta F / \partial W_p)_{T,P} = (\partial \Delta E / \partial W_p)_{T,P} - T \cdot (\partial \Delta S / \partial W_p)_{T,P}$  (7).

При дифференцировании выражения (5) по  $T$  получаем:  $\partial(\Delta F / \partial W_p)_{T,P} / \partial T = -(\partial \Delta S / \partial W_p)_{T,P}$ . С учетом выражения (4) имеем зависимость для дифференциального изменения энтропии связанной воды:

$$(\partial \Delta S / \partial W_p)_{T,P} = -\partial(R \cdot T \cdot \ln \phi) / \partial T \quad (6).$$

Используя формулу (5) определим численные значения свободной энергии  $\partial \Delta F / \partial W_p$ , связанной энергии  $-T \cdot (\partial \Delta S / \partial W_p)$  и внутренней энергии (теплого эффекта)  $\partial \Delta E / \partial W_p$  процесса сорбции (рисунок 3, при  $T = 333$  K).

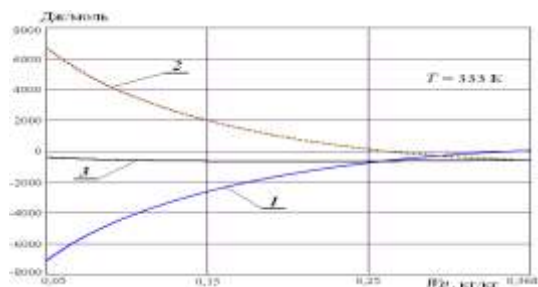


Рисунок 3 – Зависимости дифференциального изменения свободной энергии (1), связанной энергии (2) и теплового эффекта (3) сорбции от равновесной влажности в процессе сорбции паров воды экстрактом зеленого чая

Дифференциальное изменение внутренней энергии отрицательно практически во всем диапазоне влажности, т.е. присутствуют тепловые эффекты при сорбции паров воды. Характер зависимостей дифференциальных изменений свободной энергии, связанной энергии и теплового эффекта сорбции типичен для большинства биополимерных систем. Сделан вывод, что для интенсификации сушки растительного экстракта целесообразно повышение поверхности массообмена диспергированием продукта (распыление) и использование объемных вариантов энергоподвода, в частности конвективного энергоподвода.

При удалении связанной с материалом влаги удельная тепловая энергия испарения  $r$ , входящая в дифференциальное уравнение теплопереноса, представляется в виде суммы теплоты парообразования свободной воды  $r'$ , теплоты смачивания  $r_{см}$  и энтропийной составляющей теплоты  $r_{энт}$ , характеризующей связь (влаги макро- и микрокапилляров, пор, иммобилизационная и осмотически удерживаемая жидкость). Количество тепловой энергии, необходимое для испарения 1кг влаги материала определяется по формуле:

$$r = r' + r_{ii} + r_{yo} = 3118,4581 \cdot 10^3 - 2286,66 \cdot T - 55,5 \cdot R \cdot T \cdot \ln \varphi + 55,5 \cdot T \cdot (\partial S / \partial W_p), \quad (7).$$

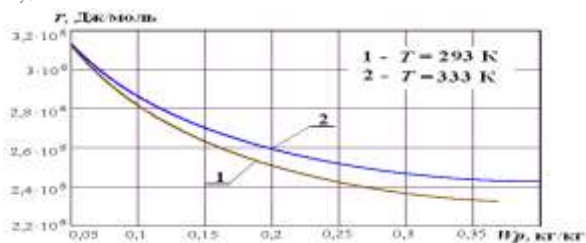


Рисунок 4 – Зависимость удельной тепловой энергии испарения от равновесной влажности в процессе сорбции паров экстрактом зеленого чая

Анализ зависимостей (рисунок 4) и сопоставление результатов исследований с экспериментальными данными (таблица 2.8) позволяет сделать следующие выводы: - на участках  $W_e \leq W_p \leq W_g$ , соответствующих осмотически-связанной влаге и жидкости заключенной в объеме микро- и макрокапилляров отмечается отклонение значений удельной тепловой энергии испарения  $r$  от значений теплоты парообразования свободной воды  $r'$  (в пределах  $\leq 5\%$ ).

- на участках  $W_k < W_p < W_e$ , соответствующих жидкости полимолекулярной адсорбции отмечается стремительный рост значений удельной тепловой энергии испарения  $r$  при уменьшении равновесной влажности до  $W_k$ , что обусловлено возрастанием энергии физико-химической связи молекул воды со скелетом.

Результаты исследований необходимы для научного анализа кинетики и динамики тепломассообменных процессов, их моделирования и оптимизации.

**В третьей главе** представлены результаты изучения механизма внутреннего тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая на основе исследования кинетики процесса.

В ходе экспериментов на установке распылительной суши (рисунок 5), в установившемся режиме производился отбор проб продукта из зоны суши их улавливанием на поверхность гидрофобного материала для определения степени обезвоживания на разных стадиях процесса и построения экспериментальных кривых суши (рисунок 6). В качестве основных факторов, влияющих на эффективность процесса суши были приняты: температура сушильного агента  $T_{с.а.} = 443..483\text{K}$  и начальная температура продукта  $T_{prod} = 293..323\text{K}$ . Для получения зависимостей скорости суши  $dW/d\tau$  или  $dc/d\tau$ ,  $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$  от влажности  $W$  или содержания сухих веществ  $c$ ,  $\text{кг}/\text{кг}$  ( $c = 1 - W$ ) экспериментальные данные описаны полиномиальной зависимостью вида:

$$\tau(W) = a_k \cdot W^4 + b_k \cdot W^3 + c_k \cdot W^2 + d_k \cdot W + e_k, \quad (8)$$

где  $\tau(W)$  – время суши, с;  $a_k, b_k, c_k, d_k, e_k$ , – эмпирические коэффициенты.

Учитывая формулу связи  $W=1-c$ , после математических преобразований:

$$dc/d\tau = -1/(4 \cdot a_k \cdot (1-c)^3 + 3 \cdot b_k \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot c_k \cdot (1-c) + d_k) \quad (9).$$

Обобщая экспериментальные данные, получена зависимость:

$$dc/d\tau = -1/\left[4 \cdot (A_k \cdot T_{с.а.}^2 + B_k \cdot T_{с.а.} + C_k) \cdot (1-c)^3 + 3 \cdot (D_k \cdot T_{с.а.}^2 + E_k \cdot T_{с.а.} + F_k) \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot (G_k \cdot T_{с.а.}^2 + H_k \cdot T_{с.а.} + K_k) \cdot (1-c) + (L_k \cdot T_{с.а.}^2 + M_k \cdot T_{с.а.} + N_k)\right], \quad (10)$$

где  $A_k, B_k, C_k, D_k, E_k, F_k, G_k, H_k, K_k, L_k, M_k, N_k$ , – кинетические коэффициенты.

С целью установления рациональных режимов для организации распылительной суши экстракта используя (10) можно определять значения скорости процесса для различных сочетаний влияющих факторов.

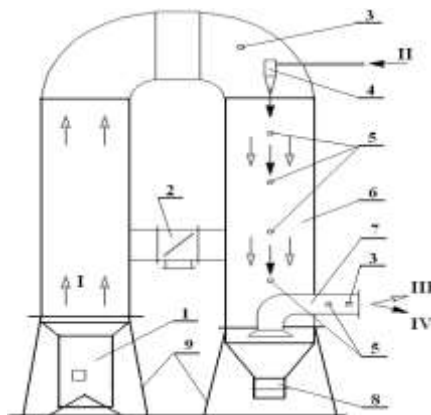


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки:

1 – электрокалорифер;  
2 – байпас с регулирующей дроссельной заслонкой; 3 – термопара; 4 – форсунка; 5 – штуцеры для отбора проб продукта; 6 – сушильная камера; 7 – трубопровод для отвода продукта и сушильного агента из зоны суши; 8 – сборник продукта; 9 – опоры. Потоки: I – сушильный агент; II – исходный экстракт; III – отработавший сушильный агент в циклон; IV – сухой экстракт – порошок.

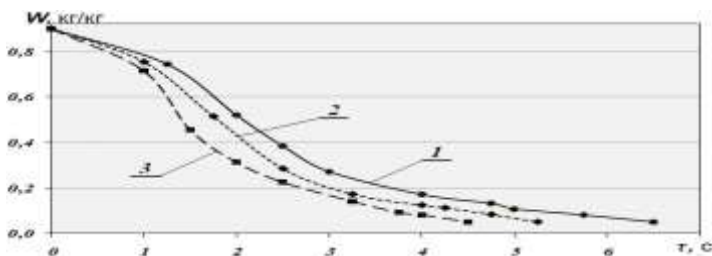


Рисунок 6 – Кинетика конвективной распылительной сушки экстракта при  $T_{prod} = 293K$ : 1 – при  $T_{c.a.} = 443K$ ; 2 – при  $T_{c.a.} = 463K$ ; 3 – при  $T_{c.a.} = 483K$ .

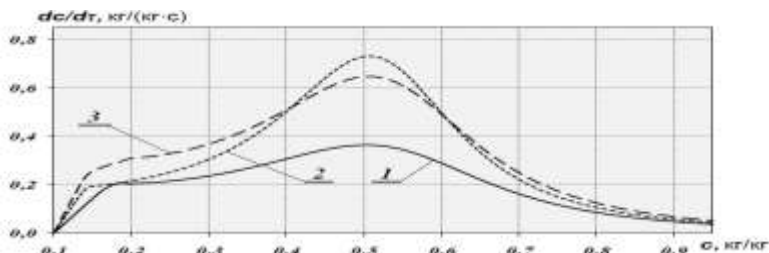


Рисунок 7 – Кривые скорости конвективной распылительной сушки экстракта при  $T_{prod} = 308K$ : 1 – при  $T_{c.a.} = 443K$ ; 2 – при  $T_{c.a.} = 463K$ ; 3 – при  $T_{c.a.} = 483K$ .

Анализ характера экспериментальных кривых скорости сушки экстракта зеленого чая (например, рисунок 7) и результатов исследований ряда авторов позволяет сделать вывод о том, что при интенсивной распылительной сушке зависимость скорости носит экстремальный характер. Отмечается быстрый рост функции  $dc/d\tau$  до максимального значения с последующим резким падением, что обусловлено процессами формирования капиллярно-пористой структуры частиц продукта при их обезвоживании. Первый период соответствует росту скорости обезвоживания от начального значения при начальной влажности  $W_n$  до максимального значения скорости. Стремительное удаление преимущественно свободной влаги с поверхности частиц за счет интенсивного испарения исключает перегрев продукта на первоначальном этапе процесса. Происходит уменьшение объема распыленной частицы. В конце первого периода, влажность на поверхности частицы достигает гигроскопического значения. Актуализируются процессы удаления влаги полимолекулярной адсорбции и далее объем частиц практически не изменяется. Интенсифицируется прогрев материала. Во втором периоде (рисунок 7), после максимальной скорости и до достижения конечной влажности  $W_k$ , в результате возрастающего несоответствия между расходом влаги, испаряющейся с поверхности частицы, и расходом влаги, поступающей из внутренних слоев, происходит углубление зоны испарения вглубь частицы.

В четвертой главе реализована математическая постановка и решена задача совершенствования тепломассообменных процессов при сушке экстракта зеленого чая. Задачей совершенствования процесса являлась разработка рекомендаций по промышленной организации режима сушки, который обеспечивает наибольшую удельную производительность и влагонапряженность установки при сохранении

качества продукции. Целевой функцией выбрана удельная производительность – сьем сухого продукта в единицу времени с единицы объема рабочей зоны сушильной камеры  $\Pi$ , кг/(м<sup>3</sup>·ч):

$$\Pi(Tc.a., T_{\text{прод.}}) = (a_w \cdot T_{\text{прод.}}^2 + b_w \cdot T_{\text{прод.}} + c_w) \cdot Tc.a.^2 + (d_w \cdot T_{\text{прод.}}^2 + e_w \cdot T_{\text{прод.}} + f_w) \cdot Tc.a. + (g_w \cdot T_{\text{прод.}}^2 + h_w \cdot T_{\text{прод.}} + k_w) \quad (11)$$

где  $a_w, b_w, c_w, d_w, e_w, f_w, g_w, h_w, k_w$ , – эмпирические коэффициенты. Размерность эмпирических коэффициентов равна отношению размерности функции к размерности аргумента (или произведения аргументов). Таким образом, размерность  $a_w$  – кг/(м<sup>3</sup>·ч·К<sup>4</sup>);  $b_w, d_w$ , – кг/(м<sup>3</sup>·ч·К<sup>3</sup>);  $c_w, e_w, g_w$  – кг/(м<sup>3</sup>·ч·К<sup>2</sup>);  $f_w, h_w$  – кг/(м<sup>3</sup>·ч·К);  $k_w$ , – кг/(м<sup>3</sup>·ч).

Удельная влагонапряженность объема камеры, соответствующая количеству испаренной влаги с единицы объема камеры в единицу времени  $B$ , кг/(м<sup>3</sup>·ч):

$$B = \ddot{I} \cdot (W\dot{i} - W\dot{e}) / (1 - W\dot{i}) \quad (12)$$

Поля значений  $\Pi$  и  $B$  (рисунок 8) построены с использованием функциональных зависимостей (12) и (13).

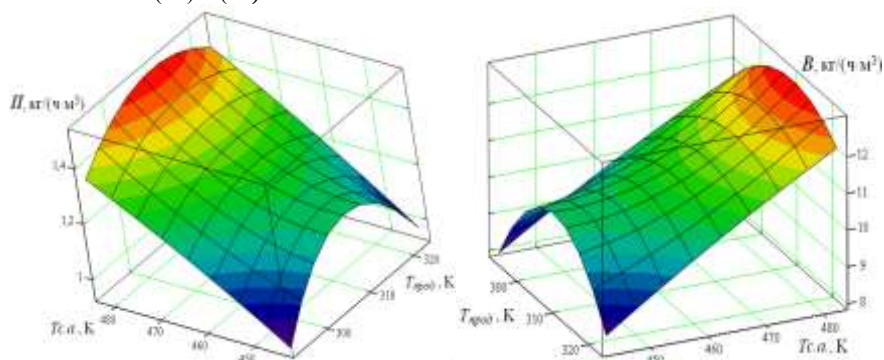


Рисунок 8 – Поля значений удельной производительности и удельной влагонапряженности

Численные значения удельной производительности и удельной влагонапряженности рабочего объема сушильной камеры, достигаемые в ходе экспериментальных исследований распылительной сушки экстракта зеленого чая сопоставимы со значениями данных величин при обезвоживании растительных экстрактов на промышленных установках.

Анализ характера полей значений удельной влагонапряженности и удельной производительности (рисунки 4.1 и 4.2) показал, что с ростом исходных температур экстракта и сушильного агента существенно интенсифицируются тепломассообменные процессы, что определяет рост функций за счет сокращения продолжительности сушки. Рост значений удельной производительности (удельной влагонапряженности) при увеличении исходной температуры экстракта в диапазоне  $T_{\text{прод.}} = 293 \dots 313\text{K}$  (рисунок 8) очевиден, так как сокращаются затраты энергии теплоносителя на прогрев продукта и повышается термический к.п.д сушильной установки. При  $T_{\text{прод.}} = 310\text{ K}$  достигаются максимумы сьема сухого продукта и количества испаренной влаги с единицы объема камеры, а далее при  $T_{\text{прод.}} = 310 \dots 323\text{ K}$  отмечается снижение значений  $\Pi$  и  $B$ , что обусловлено некоторым

снижением скоростных характеристик внутреннего тепломассопереноса в частице продукта и внешнего тепломассообмена при контакте распыленных частиц экстракта зеленого чая с сушильным агентом. Границы варьирования исходной температуры экстракта зеленого чая (таблица 3.3) установлены из технологических ограничений. Нижний предел  $T_{prod} = 293$  К, соответствует температуре хранения жидких водных растительных экстрактов, а верхний предел  $T_{prod} = 323$  К может достигаться предварительным нагревом экстракта, в том числе в ходе вакуум – выпаривании. С ростом начальной температуры сушильного агента удельная производительность (удельная влагонапряженность) рабочего объема сушильной установки также увеличивается (рисунок 8). Увеличение температуры экстракта  $T_{prod} \geq 323$  К и температуры сушильного агента  $T_{c.a.} \geq 483$  К приводит к термическому разложению растительного материала в ходе перегрева при сушке, что подтверждается результатами анализа качественных показателей сухого экстракта – порошка.

Установлен рациональный режим сочетания температур продукта и сушильного агента для обеспечения максимумов функций удельной производительности и удельной влагонапряженности рабочего объема сушильной камеры (таблица 2).

Таблица 2 – Максимумы удельной производительности и удельной влагонапряженности, время сушки и рациональные значения варьируемых параметров

| <div> <div>Параметр</div> <div>Продукт</div> </div> | $\Pi$ , кг/(м <sup>3</sup> ·ч) | $B$ , кг/(м <sup>3</sup> ·ч) | $\tau_c$ , с | $T_{c.a.}$ , К | $T_{prod}$ , К |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------|----------------|----------------|
| Экстракт<br>( $W_n = 0,9$ кг/кг)                    | 1,528                          | 12,985                       | 4            | 483            | 310            |

В ходе комплекса теоретических и экспериментальных исследований установлено, что эффективное обезвоживание водного экстракта зеленого чая с начальной влажностью  $W_n = 0,9$  кг/кг при конвективной распылительной сушке с удельной производительностью по сухому порошку экстракта  $\Pi = 0,937..1,528$  кг/(м<sup>3</sup>·ч) и удельной влагонапряженностью рабочего объема сушильной камеры  $B = 7,962..12,985$  кг/(м<sup>3</sup>·ч) необходимо осуществлять при следующих диапазонах варьирования режимных параметров:

- Начальная (исходная) температура водного экстракта зеленого чая  $T_{prod} = 293..318$  К;
- Начальная (исходная) температура нагретого воздуха – сушильного агента  $T_{c.a.} = 443..503$  К;
- Конечная температура отработавшего сушильного агента 343..353 К;
- Способ подачи экстракта зеленого чая в сушильную камеру – распыление.
- Способ распыления – акустический, механический и др.
- Начальный диаметр распыленных частиц экстракта 20..30 мкм.
- Средний характерный размер частиц сухого экстракта– порошка 1..6 мкм.
- Удельный расход сушильного агента на 1 кг испаренной влаги  $Q_{c.a.} = 20$  кг/кг.
- Параметры воздуха рабочей зоны производственного помещения перед нагревом и направлением в сушильную камеру (ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны и СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений): температура  $T_e = 285..303$  К; влажность воздуха составляет  $\phi_e = 40..75\%$ .

Рекомендованные режимы позволяют использовать для обезвоживания экстракта зеленого чая типовые конструкции распылительных сушильных установок при уточнении параметров в ходе пуско-наладочных работ.

**В пятой главе** представлены результаты расчета температурных полей в высушиваемой частице при распылительной сушке экстракта зеленого чая и реализации математической модели тепломассопереноса.

Математическая модель основана на решении методом конечных разностей дифференциального уравнения переноса тепла с учетом кинетики процесса сушки, свойств материала и термодинамических параметров и др. При моделировании принимаем, в качестве допущения, что в ходе конвективной распылительной сушки обеспечивается объемный равномерный подвод энергии для правильной формы частицы – шар диаметром  $d_e = 20..30$  мкм (достигается распылением) размер которой не меняется во времени сушки.

За первую координату  $x$ , которая характеризует высушиваемую каплю/частицу и от которой зависит искомая целевая температурная функция  $t(x,y)$  принимаем диаметр капли/частицы  $d$ , мкм. Таким образом,  $x = 0..d_e$ :  $Xn = 0$  и  $Xk = d_e$  – соответственно начальное (исходное) и конечное значения координаты  $x$ , которые соответствует диаметрально противоположным точкам на поверхности капли/частицы. В данном случае логично отказаться от использования полярных координат, так как эволюция температурного поля во времени процесса не зависит от угла и направления энергоподвода.

За вторую координату для решения дифференциального уравнения и составления разностной сетки принимаем содержание сухих веществ  $c$ , кг/кг (или влажность продукта  $W$ , кг/кг), которая связана функциональной зависимостью (определена экспериментально) со временем процесса сушки  $\tau$ , с. Координата  $W = Wn..Wk$  (или  $c = Cn..Ck$ ): Начальное значение координаты  $W$  (или  $c$ ), соответствующее началу процесса сушки в начальный момент времени при  $\tau=0$ :  $Wn$  ( $Cn = 1-Wn$ ). Конечное значение координаты  $W$  (или  $c$ ), соответствующее концу процесса сушки при  $\tau = \tau_c$ :  $Wk$  (или  $Ck = 1 - Wk$ ).

В качестве допущения принимаем, что структура частиц высушиваемого материала изотропна и, следовательно, поле влажности равномерно по диаметру капель/частиц малых размеров.

В случае объемного энергоподвода дифференциальное уравнение переноса тепла при одномерной задаче (внутренний источник тепла отсутствует):

$$c'(W) \cdot \rho(W) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(x, t, W) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \varepsilon \cdot r(x, t, W) \cdot \rho(W) \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau}, \quad (13)$$

где  $x$  – координата глубины частицы, м;  $\varepsilon = 1$  – коэффициент фазовых превращений, при влагопереносе в виде пара равен 1 при допущении, что структура материала изотропна;  $\partial W / \partial \tau$  – скорость сушки, кг/(кг·с).

С учетом допущения, что структура частицы изотропна, то теплопроводность не зависит от координаты  $x$ , таким образом, среднюю по слою теплопроводность вынесем за знак дифференциала и преобразуем выражение, разделив обе части уравнения на  $c'(W) \cdot \rho(W) = c_v$ , то получим:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \bar{a}(t, W) \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r(t, W) \bar{\rho}(t, W)}{\bar{c}_v(t, W)} \cdot \frac{\partial \bar{W}}{\partial \tau}, \quad (14)$$

Преобразовав и далее опускаем знак среднего и варьируемого параметров:

$$\frac{\partial t}{\partial W} = \frac{a}{\frac{\partial W}{\partial \tau}} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r \cdot \rho}{c_v} \quad (15)$$

Решение уравнения (15) – искомая температурная функция  $t = f(x, W)$ .

В первоначальный момент времени  $\tau = 0$  (сразу после выхода продукта из распылителя в сушильную камеру), и, соответственно, при исходной влажности экстракта  $W_n$ , температура всех пространственных точек частицы экстракта одинакова и соответствует  $t_0 = T_{\text{прод}}$ . Начальные условия:  $W = W_n$ ,  $t = t_0$ . При реализации модели конечные условия предыдущего участка при текущей влажности экстракта  $W$  (распределение значений температур по диаметру частицы) являются начальными условиями для последующего участка при следующем шаговом значении влажности  $W$ .

Граничные условия на границе материала с сушильным агентом:

$$-\lambda(W) \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha (T_c \cdot a - t_{x=0}(\text{поверх})) \quad (16)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{x=0}(\text{поверх})$  – температура поверхности распыленной частицы, К.

Для удобства дифференцирования, при численной реализации модели заменим влажность  $W$  концентрацией сухих веществ  $c$ . Дифференциальное уравнение параболического типа решалось фундаментальным методом конечных разностей в среде специализированного программного обеспечения Mathcad и определены температурные функции по  $d_e$  и изменяющемуся во времени  $c$  (рисунок 9).

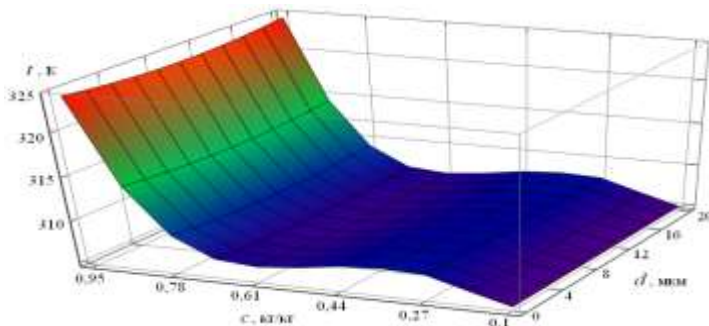


Рисунок 9 – Поле распределения значений температур в объеме капли/частицы экстракта зеленого чая при сушке, рациональный температурный режим:  $T_{\text{прод}} = 313\text{K}$ ;  $T_c \cdot a = 483\text{K}$ .

На рисунке 10 в графическом виде представлены зависимости средней объемной температуры  $t_{cp}$ , К от содержания сухих веществ для различных режимов.

В ходе анализа температурных функций установлено, что колебания температуры по слою продукта в его пространственных точках незначительны (1..2 К) во всем диапазоне изменения содержания сухих веществ, что свойственно для распылительной сушки тонкодисперсных капель/частиц. Полученные аналитически температурные функции (поверхности) сопоставим с ранее установленными зависимостями для скорости сушки (рисунок 7). На начальной стадии процесса в период интенсивного влагоудаления преимущественно влаги

несвязанной с материалом до максимума функций скорости сушки капли/частицы материала практически не нагреваются (рисунки 9 и 10).

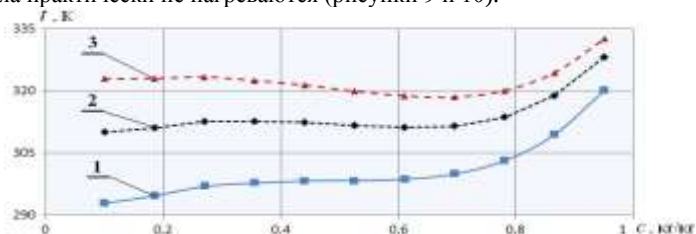


Рисунок 10 – Зависимость средней объемной температуры от содержания сухих веществ частицы экстракта зеленого чая при распылительной сушке: 1 –  $T_{\text{прод}} = 293\text{K}$ ;  $T_{\text{с.а.}} = 483\text{K}$ ; 2 –  $T_{\text{прод}} = 310\text{K}$ ;  $T_{\text{с.а.}} = 483\text{K}$  (рациональный температурный режим); 3 –  $T_{\text{прод}} = 323\text{K}$ ;  $T_{\text{с.а.}} = 443\text{K}$ .

Тепловая энергия нагретого воздуха – сушильного агента используется максимально полезно и без термодинамических потерь расходуется на фазовый переход, то есть на испарение свободной влаги. Изотермическое испарение свободной влаги с поверхности капель/частиц в начале сушильного процесса аргументировано в классических работах и исключает перегрев продукта на первоначальном этапе.

Далее после достижения максимума для всех режимов наблюдается снижение значений скорости (рисунок 7), что свидетельствует о переходе к удалению из материала влаги, связанной с ним – преимущественно влаги полимолекулярной адсорбции (для экстракта зеленого чая). При уменьшении скорости, очевидно, интенсифицируется прогрев материала и происходит углубление зоны испарения.

Адекватность математической модели оценена по температуре в слое готового порошка высушенных частиц (температура поверхности частицы). Данная оценка проводилась в ходе тестирования установленных режимных параметров.

**В шестой главе** представлены рекомендации по практическому применению результатов научных и проектно-технических решений. Проведено тестирование и опытно-промышленная реализация режимов сушки экстракта зеленого чая.

Получение исходных экстрактов для последующей сушки было организовано с использованием комплекса экспериментальных и опытно-промышленных установок научно-исследовательских лабораторий кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» и с использованием производственных установок ООО «Инновационные технологии продуктов питания» (г. Астрахань).

Приготовление экстракта зеленого чая производилось в периодическом режиме и технология приготовления включала стадии: предварительное измельчение сырья, подготовку экстрагента – очищенной воды; проведение экстракции 1 – получение первичной вытяжки; проведение экстракции 2 – получение вторичной вытяжки; отстаивание; фильтрация для отделения экстракта от осадка; центрифугирование; смещение экстрактов (первичной и вторичной вытяжки), концентрирование экстракта при вакуумном выпаривании. При двухкратном экстрагировании гидромульти составлял 10..15 мл/г (1:10..1:15), температура экстракции – 343..363K. Процесс экстракции проводился 60..80 минут на основании рекомендаций литературных источников. Для экстрагирования использовался реактор УПЭС

модели 0,15/3,0 при перемешивании. В ходе экстрагирования (после перемешивания экстрактов двух степеней) достигалась концентрация сухих веществ 2..4%. От осадка экстракт чая отделяли методами отстаивания, фильтрования и далее экстракт осветляли в процессе отстойного центрифугирования. Температура экстракта после отстаивания при фильтрации и центрифугировании составляла 313..363К, что минимизировало процессы осаждения веществ танино-катехинового комплекса. Концентрирование экстракта осуществляли в вакуум-выпарном аппарате до содержания сухих веществ 8..12% в экстракте. Тестирование режимов сушки выполнено на установке распылительной сушки Ohkawara Kakohki OL/OC-L8. Диапазон температуры при тестировании  $T_{с.а.} = 443..483$  К. Диапазоны регулировки: расход материала  $G_{Wн} = 1,5 - 2,5$  кг/ч; начальная температура продукта  $T_{prod} = 293..318$ К; температура воздуха на выходе из сушилки 343..353 К. Размер капель/частиц (исходный) 20 – 30мкм.

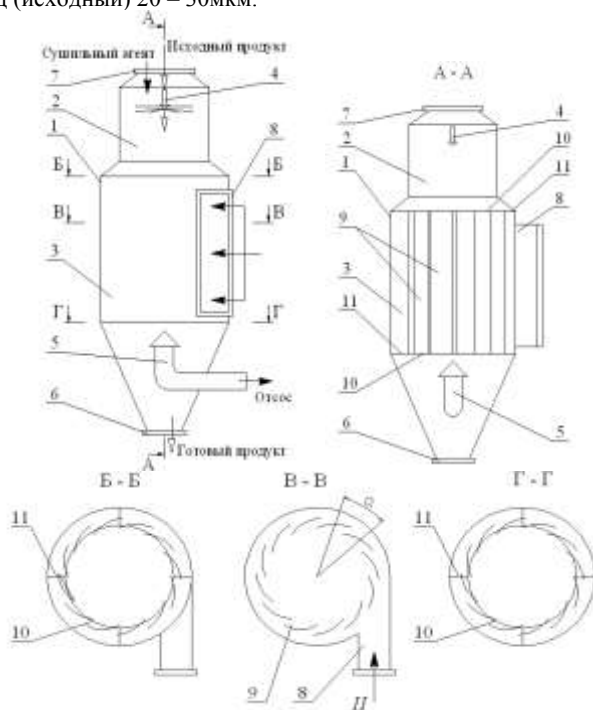


Рисунок 11– Распылительная сушилка: 1 – камера; 2 – цилиндр; 3 – цилиндр; 4 – распылитель 4 (механический дисковый, акустический или ультразвуковой); 5 – система (газоходы, циклон и др.) отсоса и улавливания частиц материала; 6 – узел выгрузки; 7, 8 – патрубки; 9 – перегородки; 10 – крепления; 11 – крепежные элементы

Установлены рабочие диапазоны варьирования основных факторов для стабильной работы установки. В сборнике сухого продукта сушильной установки осуществлялась регистрация конечной температуры экстракта – готового порошка, которая составляла 308..328 К, что подтвердило адекватность предложенной математической модели и определяет сохранность качества при сушке.

Показатели качества сухого экстракта зеленого чая соответствуют требованиям ГОСТ Р ИСО 6079-2012 «Чай растворимый. Технические условия», ГОСТ 32593 — 2013 «Чай и чайная продукция», Требованиям ТР ТС 021/2011 (Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции) и нормативам к растительным экстрактам и сырью по СанПин 2.3.2.1078-01.

Для эффективной промышленной организации процесса распылительной сушки растительных экстрактов предложена конструкция (рисунок 11) установки для сушки (патент на полезную модель 191126 РФ).

Положительный эффект от модернизации конструкции обеспечивается прежде всего установкой круговым массивом вокруг оси сушильной камеры 1 с зазорами между собой вертикальных криволинейных перегородок 9 внутри цилиндра 3, что позволяет сформировать каналы — щели для поступления сушильного агента. Предложенная конструкция обеспечивает организацию активного аэродинамического массообменного контакта материал-теплоноситель по нисходящей до зоны выгрузки и улавливания сухого материала спиралевидной траектории. В сравнении с традиционным прямоточным и прямолинейным движением фаз, организованное спиралевидное движение системы материал-теплоноситель обуславливает более полное использование/задействие рабочего объема сушильной камеры и, следовательно, обеспечивает наибольшее время сушки при контакте материал-теплоноситель.

Представлена информация о промышленном внедрении и практическом использовании результатов исследований на предприятиях отрасли.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1) Установлены и проанализированы функциональные зависимости для расчета структурно-механических, теплофизических и гигроскопических характеристик концентратов экстракта зеленого чая.

2) Установлено и проанализировано влияние влажности концентратов экстракта зеленого чая и их температуры на структурно-механические, теплофизические и гигроскопические характеристики концентратов экстракта зеленого чая.

3) Исследованы сорбционные явления при контакте концентратов экстракта зеленого чая с водой и установлены соответствующие математические зависимости для оценки видов и энергий связи влаги с сухими веществами экстракта.

4) Исследована эффективность расхода тепловой энергии, затрачиваемой на высушивание экстракта зеленого чая с учетом термодинамических потерь тепла. Проанализированы внутренний тепломассоперенос и фазовые превращения в процессе сушки экстракта зеленого чая.

5) Исследованы кинетические закономерности тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая.

6) В ходе комплекса теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что эффективное обезвоживание водного экстракта зеленого чая с начальной влажностью  $W_n = 0,9 \text{ кг/кг}$  при котором достигается удельная производительность по сухому порошку экстракта  $0,937..1,528 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{ч)}$  и удельная влагонапряженность рабочего объема сушильной камеры  $7,962..12,985 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{ч)}$  надлежит реализовывать при распылительном способе и следующих условиях:

- Начальная (исходная) температура водного экстракта зеленого чая 293..318 К;
- Начальная (исходная) температура нагретого воздуха – сушильного агента 443..503 К;
- Конечная температура отработавшего сушильного агента 343..353 К;
- Способ подачи экстракта зеленого чая в сушильную камеру – распыление.
- Способ распыления – акустический, механический и др.
- Начальный (исходный) диаметр распыленных частиц экстракта зеленого чая 20..30 мкм;
- Средний характерный размер частиц сухого экстракта зеленого чая – порошка 1..6 мкм.
- Расход сушильного агента на 1 кг испаренной влаги 20кг/кг.
- Параметры воздуха рабочей зоны производственного помещения перед нагревом и подводом в сушильную камеру (ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны и СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений): температура 285..303К; влажность воздуха составляет 40..75%.

7) Реализована математическая модель внутреннего тепломассопереноса при распылительной сушке экстракта зеленого чая с учетом свойств материала, технологических, термодинамических параметров процесса и кинетических закономерностей влагоудаления.

8) Разработана конструкция сушильной установки и получен патент на полезную модель 191126 РФ для практического внедрения.

9) Разработаны и апробированы в промышленности рекомендации по практическому использованию результатов проектно-технических решений и научных исследований.

ООО «БИОПОЛИМЕР-НЕО», АО «ОРЕЛПРОДУКТ», ООО «Инновационные технологии продуктов питания», ООО «ЭЛЕКТРОН» и Ассоциация Астраханских рестораторов и кулинаров внедрили и используют результаты и рекомендации диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

### **В периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

- 1. Теличкин, Р.С.** Экспериментально-аналитическое исследование кинетики влагопоглощения сухими растительными материалами [Текст] / Ю.А. Максименко, Р.С. Теличкин, Н.Э. Пшеничная // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2017. №3 (17). С. 72-77.
- 2. Теличкин, Р.С.** Анализ эффективности работы распылительных сушилок при обезвоживании растительных материалов [Текст] / Ю.А. Максименко, Э.Р. Теличкина, Р.С. Теличкин // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2018. №3 (23). С. 55-61.
- 3. Теличкин, Р.С.** Распылительная сушилка [Текст] / Ю.А. Максименко, А.А. Неваленная, Н.П. Васина, Р.С. Теличкин // Естественные и технические науки. 2018. №12 (126). С. 291-294.
- 4. Теличкин, Р.С.** Конвективно-радиационная распылительная сушилка [Текст] / Ю.А. Максименко, А.А. Неваленная, Р.С. Теличкин, Н.П. Васина, В.В. Давидюк //

Естественные и технические науки. 2019. №2 (128). С. 157-159.

**5. Теличкин, Р.С.** Распылительная сушильная установка [Текст] / Ю.А. Максименко, А.А. Неваленная, И.Ю. Алексанян, Р.С. Теличкин // Современная наука и инновации. 2020. №2. С. 73-77.

#### **Статьи и материалы конференций:**

**6. Теличкин, Р.С.** Анализ кинетики распылительной сушки растительных материалов [Текст] / Ю.А. Максименко, Э.Р. Теличкина, Р.С. Теличкин // 61-я Международная научная конференция научно-педагогических работников Астраханского государственного технического университета. Астрахань. 24–28 апреля 2017 г. Режим доступа : 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

**7. Теличкин, Р.С.** Анализ эффективности работы распылительных сушилок при обезвоживании растительных материалов [Текст] / Ю.А. Максименко, Р.С. Теличкин, Э.Р. Теличкина // 62-я Международная научная конференция астраханского государственного технического университета. Астрахань. 23–27 апреля 2018 г. Режим доступа : 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

**8. Теличкин, Р.С.** Экспериментально-аналитическое исследование кинетики влагопоглощения сухими растительными материалами [Текст] / Ю.А. Максименко, Р.С. Теличкин, Н.Э. Пшеничная // 62-я Международная научная конференция астраханского государственного технического университета. Астрахань. 23–27 апреля 2018 г. Режим доступа : 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

**9. Теличкин, Р.С.** Исследования по рационализации процесса обезвоживания растительных материалов [Текст] / Ю.А. Максименко, Э.Р. Теличкина, Р.С. Теличкин // 63-я Международная научная конференция астраханского государственного технического университета. Астрахань. 22–26 апреля 2019 г. Режим доступа : 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

**10. Теличкин, Р.С.** Режимные параметры и конструкция установки для распылительной сушки экстракта зеленого чая [Текст] / Р.С. Теличкин, Ю.А. Максименко, Э.Р. Теличкина // 64-я Международная научная конференция астраханского государственного технического университета. Астрахань. 2020 г. Режим доступа : 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

#### **Патент:**

**11. Пат. 191126 РФ, МПК F26B 17/10 / Распылительная сушилка** [Текст] / И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко, А.А. Неваленная, **Р.С. Теличкин**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «АГТУ»). – № 2019100749; заявл. 10.01.2019; опубл. 25.07.2019, Бюл. № 21.

Подписано в печать « 07 » 12. 2020 г. Формат 60х84 1/16  
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_  
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «АГТУ»)  
Типография ФГБОУ ВО «АГТУ»  
Адрес типографии  
г. Астрахань, ул. Татищева, 16 ж.