

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»

На правах рукописи

Малази Самуэль Али

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОЙ
СУШКИ КАЗЕИНА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕПЛОМАССОБМЕНА
И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Беяева Марина Александровна

Москва – 2021

Оглавление

Введение	5
Глава 1 Современные представления о процессах производства казеина	10
1.1 Казеин как объект сушки.....	10
1.2 Технологические процессы производства казеина	10
1.2.1 Процесс осаждения кислотой	11
1.2.2 Процесс коагуляции сычужным ферментом.....	13
1.2.3 Процесс производства копреципитатов	14
1.2.4 Процесс производства казеината	15
1.3 Кинетика сушки казеина.....	18
1.3.1 Кривые сушки.....	18
1.3.2 Кривые скорости сушки	20
1.3.3 Температурные кривые сушки	22
1.4 Анализ современных конструкций сушилок казеина и методики расчета....	23
1.4.1 Ленточные установки	24
1.4.2 Установки с кипящим слоем.....	27
1.4.3 Установки с виброкипящим слоем	32
1.4.4 Установки с фонтанирующим слоем	35
Глава 2 Системный анализ и моделирование радиационно-конвективной сушки казеина.....	40
2.1 Физическая модель процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве	40
2.2 Разработка системного подхода к структурно-параметрическому анализу процесса сушки казеина	44
2.3 Иерархическая структура анализа процесса сушки казеина	47
2.4 Структурно-параметрическое моделирование радиационно-конвективной сушки казеина.....	49
2.4.1 Разработка структурно-параметрической модели радиационно-конвективной сушки казеина.....	50
2.4.2 Корреляционный и регрессионный анализ процесса.....	59

2.4.3 Ситуационная структурно-параметрическая модель процесса сушки казеина.....	60
2.5 Моделирование и оптимизация радиационно-конвективного процесса сушки казеина.....	72
2.6 Исследование радиационно-конвективной сушки казеина с использованием критериев подобия теплообменных процессов	82
2.6.1 Исследование кинетики радиационно-конвективной сушки казеина.....	82
2.6.2 Исследование процесса сушки казеина с использованием критериев подобия теплообмена.....	86
2.7 Исследование реологических показателей сухого казеина	96
2.7.1 Исследование насыпной плотности сухого казеина	96
2.7.2 Исследование эффективной вязкости раствора казеина (20 %).....	97
Глава 3 Моделирование тепломассообменных процессов радиационно-конвективной сушки казеина и анализ результатов	101
3.1 Математическое описание влагопереноса в частице казеина в период постоянной скорости сушки	101
3.2 Математическое описание переноса влаги в период падающей скорости сушки	105
3.3 Математическое описание переноса тепла в слоях казеина в процессе сушки	109
3.4 Проверка адекватности математических моделей.....	115
3.4.1 Экспериментальные исследования процесса сушки и обсуждение полученных результатов	115
3.4.2 Адекватность математических моделей	126
Глава 4 Практическая реализация результатов исследования процесса сушки казеина в производственных условиях.....	139
4.1 Разработка перспективной конструкции конвективной ленточной сушилки с комбинированным инфракрасным подводом теплоты	139
4.2 Разработка конструкции сушилки виброаэрокипящего слоя с использованием ИК - нагрева	144

4.3 Разработка конструкции сушилки фонтанирующего слоя с использованием инфракрасного нагрева.....	149
4.4 Использование результатов работы в промышленном производстве	154
Заключение.....	160
Список литературы.....	162
Приложение А (обязательное) Описание и анализ сушки казеин	180
Приложение Б (обязательное) Качественные показатели казеина	182
Приложение В (справочное) Патент на изобретения.....	189
Приложение Г (справочное) Акт о внедрении диссертационной работы	190

Введение

Актуальность работы. Производство молочных продуктов играет большую роль в решении задач полноценного удовлетворения потребностей населения в высококачественных пищевых продуктах.

В молочной промышленности важное значение приобретают исследование и разработка новых методов термообработки, консервирования и хранения. К таким методам относится сушка. Проблема сушки молочных продуктов в настоящее время рассматривается по разным направлениям: аналитические методы исследования кинетики сушки; моделирование и оптимизация процессов тепло-массообмена; развитие технологии и техники сушки; создание высокопроизводительных сушильных аппаратов. Для совершенствования радиационно-конвективной сушки казеина необходимо учитывать, что целью сушки является не только выбор оптимального режима, но и повышение эффективности сушки и улучшение качества продукта.

В настоящее время для производства казеина используются различные сушильные аппараты с высоким энергопотреблением, поэтому исследование, направленное на разработку новых высокоэффективных сушилок, повышающих эффективность процесса сушки казеина на основе моделирования процессов влаго- и теплопереноса, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Вопросами технологии производства и сушки казеина занимались как отечественные так и зарубежные ученые: К.К.Горбатова, Н.Н.Липатов, Г.А.Барышев, Ф.Гауровиц, П.Ф.Дьяченко, Р.Раманаускас, О.В.Дымар, В.С.Трофимов, В.М.Арапов, К.К.Полянский, С.Т.Антипов, В.Н.Шаршов, М.А.Громов, В.Ф.Данилин, А.А.Соколов, Л.Я.Фадеева, Г.Р.Цыдендоржиева, И.Н.Шуманис, В.Е.Куцакова, А.Ю.Просеков, Л.М.Архипова, В.А.Ермолаев, М.Г.Курбанова, M.Carie, A.M.Mocanu, J.Wang, P.Whiteley, D.Jones, W.Cabot, de C.G.Kruif, L.M.Diamante, E.Dickinson, M.P.Ennis, C.Guo, B.E.Campbell, K.Chen, A.M.Lenhoff, O.D.Velev, V.K.Gupta, C.R.Southward, H.Zegota, B.Malolepszy, J.Pisecky, H.Schubert.

Вместе с тем, исследования, направленные на разработку радиационно-конвективных сушилок, повышающих эффективность процесса сушки казеина, моделирование процессов влаго- и теплопереноса, оптимизация и исследование сушки казеина на основе системного анализа не проводились, поэтому данное направление является перспективным и инновационным.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является разработка и моделирование радиационно-конвективного способа сушки казеина, позволяющего снизить энергопотребление и повысить эффективность сушки, улучшить качество продукта.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи исследований:

- системно-аналитическое исследование процесса сушки казеина;
- построение иерархической структуры радиационно-конвективной сушки;
- разработка физической модели сушки при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве;
- построение структурно-параметрической модели процесса сушки казеина;
- моделирование и оптимизация радиационно-конвективной сушки казеина;
- моделирование радиационно-конвективной сушки казеина с использованием критериев подобия теплообмена;
- разработка математических моделей для решения задачи тепломассообмена процесса сушки;
- практическая реализация результатов исследований радиационно-конвективной сушки казеина в производственных условиях.

Научная новизна работы.

- Разработан радиационно-конвективный способ процесса сушки казеина;
- предложена многоуровневая иерархическая структура системных исследований процесса сушки казеина;
- разработана структурно-параметрическая модель сушки казеина для прогнозирования и оптимизации эффективности процесса;

- разработаны математические модели, позволяющие определить рациональные параметры режима сушки и оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильных аппаратов;

- разработаны математические модели для решения задач тепломассообмена сушки казеина;

- разработаны проектные конструктивные решения конвективной ленточной сушилки, установок виброаэрокипящего и фонтанирующего слоя с комбинированным инфракрасным подводом теплоты, позволяющие повысить эффективность процесса сушки казеина.

Практическая значимость работы.

- Определены оптимальные режимы процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве;

- разработаны математические модели для решения задач тепломассообмена в первый и второй период сушки;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы для разработки оптимальных режимов сушки;

- предложены конструктивные решения по разработке радиационно-конвективных сушилок;

- научные и прикладные результаты исследований позволили разработать рекомендации для внедрения рациональных параметров и конструкций радиационно-конвективных устройств для сушки казеина в промышленном производстве;

- получен патент № 2743871 Российская Федерация «Шкаф для инфракрасной сушки национального кисломолочного продукта курт»;

- на разработанный способ комбинированной инфракрасной и конвективной сушки казеина оформлена заявка на от 08.10.2020 № 2020133195 патент Российской Федерации «Способ комбинированной инфракрасной и конвективной сушки казеина»

Положения, выносимые на защиту:

- способ радиационно-конвективной сушки казеина;

- структурно-параметрическая модель радиационно-конвективной сушки казеина;
- результаты экспериментальных исследований радиационно-конвективной сушки казеина по критериям подобия теплообмена;
- математические модели распределения влажности и температуры в слоях казеина и горячего воздуха в первый и второй периоды сушки;
- рекомендации по разработке конструкций высокоэффективных сушильных аппаратов и управлению режимными параметрами сушки

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует пунктам 1, 2, 3 паспорта специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств.

Апробация результатов исследования.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: третья Международная научно-практическая конференция «Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании» Москва, 18 ноября 2019 г.; пятая Международная научно-практическая конференция «Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии» Москва, 20 марта 2019 г.; Международная конференция «Инновации: перспективы, проблемы, достижения» Москва, 28 марта 2018 г.; вторая Международная научно-практическая конференция «Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании» Москва, 17 октября 2018 г.; Международная конференция «Траектории развития» Москва, 20 декабря 2017 г.

По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в т.ч. три статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией России, одна статья индексирована в международной базе цитирования SCOPUS, одна статья индексирована в базе web of science, получен патент и оформлена заявка на патент.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 190 страницах, включающих 61 рисунок и 47 таблиц. Список литературы включает 175 наименований российских и зарубежных источников.

Глава 1 Современные представления о процессах производства казеина

1.1 Казеин как объект сушки

Казеин является основным белком молока, находится в форме коллоидной дисперсии [164, 120].

В коровьем молоке казеин составляет около 80 % и сывороточные белки 20 % от общего содержания всех белков [104, 142, 155, 156, 161].

Казеин является компонентом структуры фосфопротеина, находится в свежем молоке в форме небольших частиц (мицелл казеина) [156,161].

Около 93 % казеиновых мицелл составляют казеин, а остальные кальций, магний, натрий, калий, неорганические фосфатные, цитраты и минеральные вещества [123,128].

Распределение элементов, составляющих казеин, выглядит следующим образом: *C* (52,96 %), *H* (7,13 %), *O* (22,47 %), *N* (15,60 %), *P* (0,86 %), *S* (0,78 %).

Казеин содержит четыре основных компонента в качестве первичной структуры; α_s1 - казеин, α_s2 - казеин, β -казеин и κ - казеин. (38 % α_s1 - казеина, 10 % α_s2 -казеина, 36 % β -казеина, 12 % κ -казеина) [137, 132, 122, 138, 169, 149, 129].

В молоке α_s1 -казеин 12-15 г/л, α_s2 -казеин 3-4 г/л, β -казеин 9-11 г/л и κ -казеин 3-4 г/л. [126, 113, 98, 105, 116, 127, 124, 130].

1.2 Технологические процессы производства казеина

При производстве казеина используют обезжиренное молоко с максимально допустимым содержанием липидов не более (0,05 %), с использованием одного из основных способов [175, 33, 117, 23]:

1. Осаждение кислотой (минеральное осаждение; внесение закваски; осаждение кислой сывороткой);
2. Коагуляция сычужным ферментом;

3. Копреципитаты;
4. Казеинаты.

1.2.1 Процесс осаждения кислотой

Кислотный казеин получают путем кислотной коагуляции при $pH = 4,6$ в изоэлектрической точке вырабатывают периодическим и непрерывным способами [172, 173]:

–Периодический способ:

Технология производства кислотного казеина периодическим способом включает следующие технологические операции:

1) Приемка молока: для получения сухого казеина высшего качества, цельное молоко должно соответствовать определенным показателям [172,173]: содержание сухих веществ (13,2 % – 11,7 %), белок (3,08 % – 3,70 %), и жир (3,60 % – 3,88 %).

2) Сепарирование молока: оптимальная температура сепарирования составляет около $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой частицы жира больше диаметром $0,7\text{ }\mu\text{m}$ успешно удаляются. Содержание остаточного жира обычно составляет менее $0,04\text{ г на }100\text{ г}^{-1}$ [43, 161].

3) Пастеризация обезжиренного молока: пастеризация молока проводится при температуре $74\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 15 - 20 с и охлаждается до температуры $30\text{ }^{\circ}\text{C} - 39\text{ }^{\circ}\text{C}$ [162].

4) Осаждение казеина: для осаждения казеина используются:

– метод внесения закваски: вносят закваску чистых культур молочнокислых бактерий (3 % - 5 %), процесс сквашивания продолжается (10-12 ч), затем сгусток разрезают на кубики и подогревают (1 мин.) до температуры $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Нагретое зерно одновременно вымешивают и подогревают (10 - 15 мин) до температуры $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ [155, 133, 74, 116].

– метод зерненного способа: обезжиренный казеин подогревают до температуры 37 °С, затем добавляют сыворотку (180– 200 °Т).

5) промывка казеина: казеин промывают для удаления небелковых примесей (лактоза, кислоты, молочный жир, и соли). На производстве используется трехкратная промывка [164 , 143 , 162]:

– первая промывка проводится 15 минут, при температуре 72 °С и рН воды (3,9– 4,4).

– вторая промывка проводится до температуры 90 °С, затем казеиновые зерна пастеризуются при температуре 85 °С, 15 с и рН воды (3,9-4,4).

– третья промывка, проводится с охлаждением казеина до температуры 35 °С, рН воды (4,7-5,2), влажность казеина 80 %.

б) Сушка: влажность казеина снижается путем прессования или центрифугирования до 65 %, затем проводится сушка в разных сушилках периодического действия до содержания влажности (12 %) [31, 43, 32 , 8, 7].

–Непрерывный способ:

Технология производства кислотного казеина непрерывным способом включает следующие технологические операции (рисунок 1):

1) Обезжиренное молоко подогревают до температуры 30 °С;

2) Внесение сквашенной сыворотки или раствора соляной кислоты 4,5 % к объему обезжиренного молока;

2) Полученный осажденный казеин формируется в виде зерна при температуре 49 °С 1,5 мин.;

3) Отделение сыворотки и творожного сгустка;

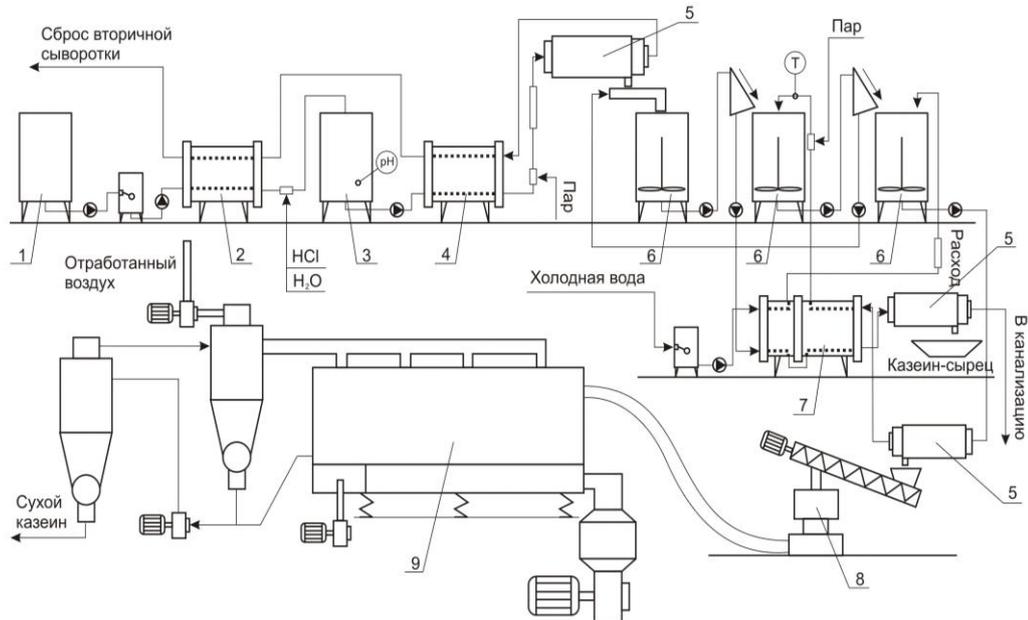
4) Промывка казеина;

5) Обезвоживания и сушка казеина на сушилках непрерывного действия.

Минеральное осаждение – кислотный казеин

Обезжиренное молоко подогревают до температуры 33 °С, затем добавляется неорганическая кислота, рН молока снижается до 4,3-4,6.

Молоко нагревается до температуры $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, в течение двух минут. Все остальные процессы проводятся как при производстве кислотного казеина непрерывным способом [116, 164, 123].



1 – емкость для хранения обезжиренного молока, 2 – теплообменник для подогрева обезжиренного молока, 3 – емкость для смешивания, 4 – теплообменник для подогрева смеси обезжиренного молока и коагулянта, 5 – декантеры, 6 – промывные емкости, 7 – теплообменник для пастеризации и нагрева промывной воды, 8 – гранулятор, 9 – сушилка кипящего слоя

Рисунок 1 – Технологическая линия производства кислотного казеина непрерывным способом с использованием декантеров

Источник: составлено автором по данным [31, 43, 32]

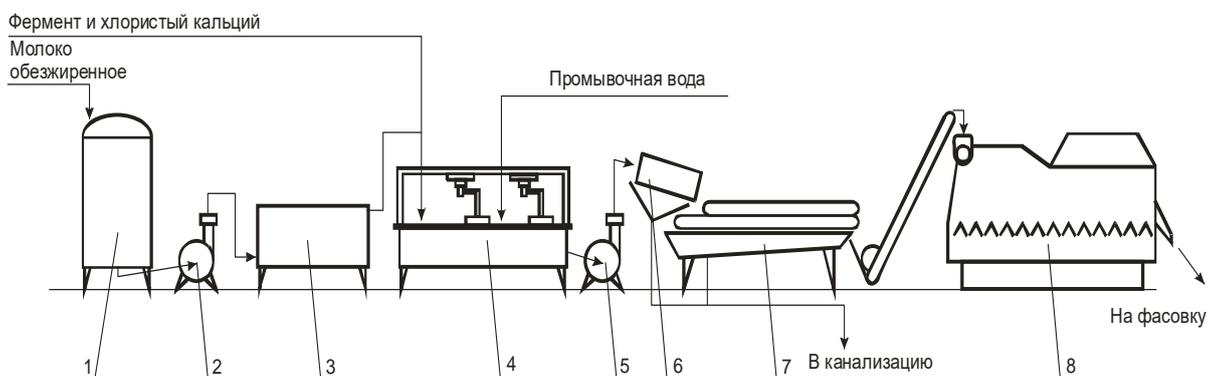
1.2.2 Процесс коагуляции сычужным ферментом

Технология производства казеина сычужным способом включает следующие технологические операции [134, 161, 164, 116]:

- обезжиренное молоко подогревают до температуры $72\text{ }^{\circ}\text{C}$, (20-25 с), и затем охлаждается до $32\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- добавляют сычужный фермент (химозин), хлористый кальций и оставляют (5-15 мин);

– полученный сгусток нарезают и подогревают до температуры 60 °С - 65 °С, 30 минут;

– сгусток казеина промывают при температуре 60 °С, прессуют затем сушат горячим воздухом до влажности 12 %.



1 – танк для хранения обезжиренного молока, 2 – насос, 3 – теплообменник, 4 – ванна, 5– насос для казеина 6– отделитель сыворотки, 7– ленточный пресс, 8– сушилка кипящего слоя

Рисунок 2 – Технологическая линия производства сычужного казеина

Источник: составлено автором по данным [22]

1.2.3 Процесс производства копреципитатов

Копреципитат - это молочно-белковые концентраты содержат казеин и сывороточные белки. Технология производства копреципитата включает следующие технологические операции (рисунок 3):

– молоко нагревается до температуры 95 °С, нагревание продолжается 10–15 минут;

– при осаждении белков молока используются метод добавления (CaCl_2) раствора хлорида кальция для получения высококальциевых копреципитатов (2,6- 3), либо метод добавления соляной кислоты или кислой сыворотки, для получения низкокальциевых копреципитатов (0,5 % - 1,5 %);

– для получения зернистого нерастворимого копреципитата, белок сушат сразу;

– для получения растворимого копреципитата, осажденный белок растворяется в щелочи NaOH, pH 6,8-7,0, выдержка продолжается 30 мин, затем подготовка раствора к сушке и сушка [33, 117, 23, 42, 7].

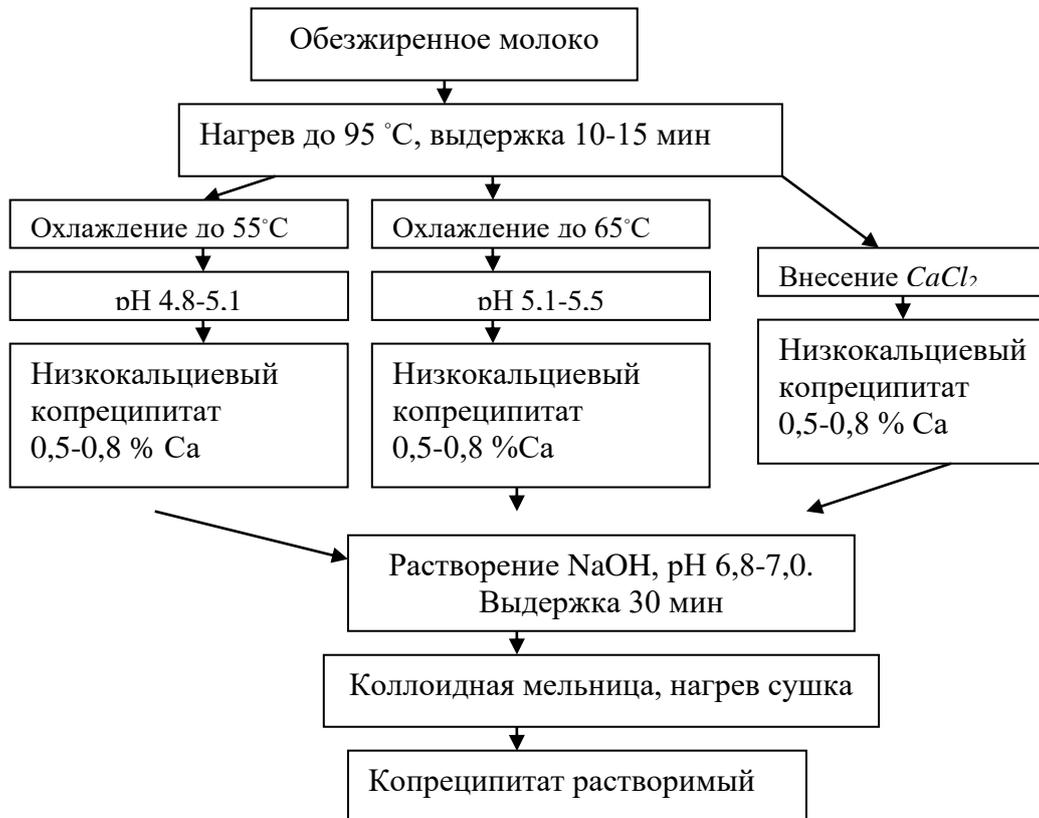


Рисунок 3 – Схема производства копреципитатов

Источник: составлено автором по данным [33, 117, 23, 42, 7]

1.2.4 Процесс производства казеината

Казеинат можно охарактеризовать как химические соединения казеина и щелочных (натрий, калий), гидроокисей щелочных (NaOH) и щелочноземельных Ca(OH)₂ металлов. Добавление гидроксида натрия (NaOH), гидроксида калия (KOH) или гидроксида кальция Ca(OH)₂, требуется для достижения конечного значения pH около 6,7. После добавления (NaOH) или Ca(OH)₂ проводят термообработку, затем контролируют вязкость и pH раствора.

Казеинат сушат на распылительных сушилках при содержании сухих веществ не более 20 % в растворе [31, 43, 32]. Технология производства всех видов казеина представлена на рисунке 4.

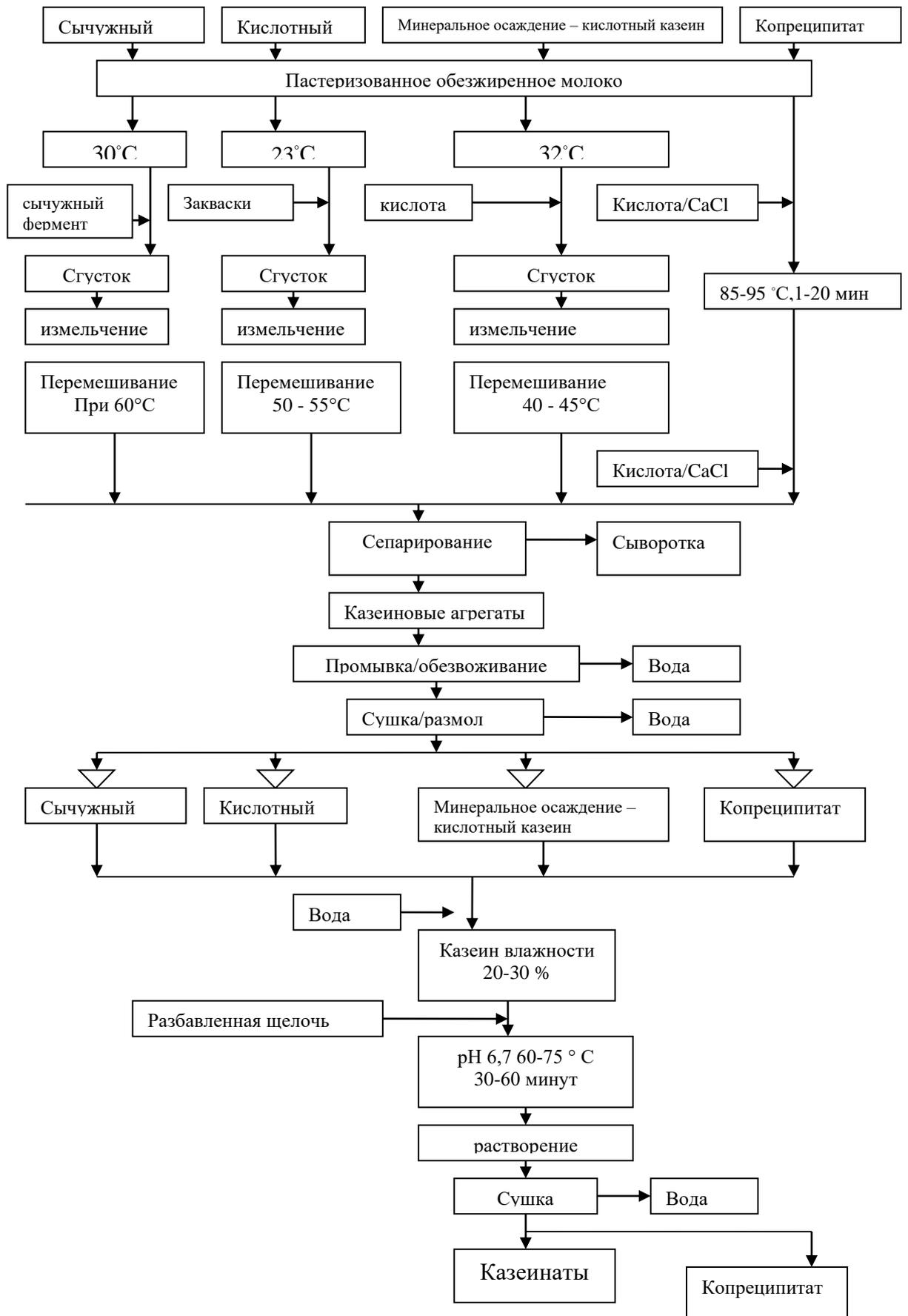


Рисунок 4 – Технология производства казеина

Источник: составлено автором по данным [33, 117, 23, 42, 7]

1.3 Кинетика сушки казеина

Процесс сушки и удаление влаги из продукта путем подведенного к нему тепла, рассматривается как внутренний массо- и теплообмен (перенос теплоты и влаги внутри) и внешний массо и теплообмен (перенос теплоты и влаги с поверхности продукта [29, 4].

1.3.1 Кривые сушки

Под кинетикой сушки понимают изменение средней (интегральной) влажности (W процент) (или влагосодержания U , кг/кг) и средней температуры продукта с течением времени τ [55, 1].

На рисунке 5 представлена кривая сушки материала, процесс сушки состоит:

– *периода прогрева*: продолжительность этого периода зависит от толщины продукта. Влажность продукта уменьшается по кривой (изменяется незначительно) а его температура увеличивается от начальной до температуры адиабатического насыщения влажного воздуха (температуры мокрого термометра). Для описания кинетики процесса сушки в периоде нагрева используется уравнение [158, 1]:

$$\frac{dw_{\text{вл.п}}}{d\tau} = -\beta \times S_{\text{уд}} (P_{\text{пов}} - P_{\text{о.с}}), \quad (1)$$

где $S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность продукта: $S_{\text{уд}} = S/m_{\text{с}}$, м²/кг;

S – площадь поверхности продукта, м²;

$P_{\text{пов}}$, $P_{\text{о.с}}$ – парциальное давление пара у поверхности продукта и в окружающей среде, Па;

β – коэффициент массоотдачи, кг/(м²×с×Па);

$m_{\text{с.п}}$ – масса абсолютно сухого продукта, кг;

$w_{\text{вл.п}}$ – влагосодержания продукта, кг/кг;

τ – продолжительность сушки, с.

В работе [95, 2, 1] также предложена кинетика сушки для периода прогрева:

$$\frac{d\bar{w}_{\text{вл.п}}}{d\tau} = -\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{н}}}{t_{\text{М.Т}} - t_{\text{н}}} \times N, \quad (2)$$

где $t_{\text{н}}$ – начальная температура продукта, °С;

$t_{\text{п}}$ – температура продукта, °С;

$t_{\text{М.Т}}$ – температура мокрого термометра, °С;

N – скорость сушки в первом периоде, кг/(кг×с);

$w_{\text{вл.п}}$ – влагосодержания продукта, кг/кг;

τ – продолжительность сушки, с.

–*Периода постоянной скорости сушки (первый период)*: в первый период сушки влажность продукта изменяется по прямой линии. Кинетика сушки первого периода сушки описывается уравнением:

$$\frac{d\bar{w}_{\text{вл.п}}}{d\tau} = \frac{\beta \times S_{\text{уд}} [t_{\text{пов}} - t_{\text{о.с}}]}{r}. \quad (3)$$

где r – удельная теплота парообразования влаги, Дж/кг;

$t_{\text{пов}}$ – температура поверхности продукта, °С;

$t_{\text{о.с}}$ – температура окружающей среды, °С;

$S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность продукта, м²/кг;

β – коэффициент массоотдачи, кг/(м²×с×Па);

$w_{\text{вл.п}}$ – влагосодержания продукта, кг/кг;

τ – продолжительность сушки, с.

–*Периода падающей (убывающей) скорости*, второй период сушки начинается, когда скорость снижения влагосодержания начинает уменьшаться.

Влагосодержание, при котором происходит переход первого периода во второй, называют критическим влагосодержанием $w_{\text{кр}}$. Влагосодержание продукта асимптотически приближается к равновесному значению. А.В. Лыков предложил уравнение кривой скорости сушки во втором периоде [53, 54, 55]:

$$\frac{dw_{\text{вл.п}}}{d\tau} = -K \times (w_{\text{вл.п}} - w_p), \quad (4)$$

$$K = \frac{N}{w_{\text{кр}} - w_p} = \chi \times N; \quad (5)$$

- где $w_{кр}$ – критическое влагосодержание, кг/кг;
 $w_{вл.п}$ – среднее влагосодержание продукта, кг/кг;
 χ – относительный коэффициент сушки;
 N – скорость сушки в первом периоде, c^{-1} ;
 τ – продолжительность сушки, с.

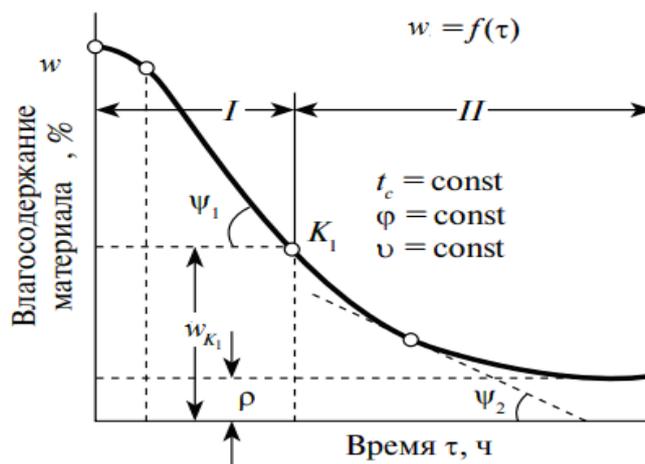


Рисунок 5– Кривая процесса сушки материала

Источник: составлено автором по данным [131, 97, 1, 28]

1.3.2 Кривые скорости сушки

Скорость сушки - это уменьшение содержания влаги материала в единицу времени ($dw/d\tau$). На рисунке 6 показаны кривые скорости сушки разных материалов. Прямая линия (1) характерна для тонких капиллярно- пористых материалов с большой удельной поверхностью испарения (бумага); типична кривая (2) для коллоидных тел; кривая (3) для капиллярно - пористых материалов с малой удельной поверхностью испарения; кривые (4) и (5) для тел более сложных систем. В периоде прогрева, скорость сушки увеличивается от 0 до максимального значения N ; в период постоянной скорости (первый период) $N = \text{const}$; затем (от критической точки $K1$) начинается падение скорости сушки (второй период).

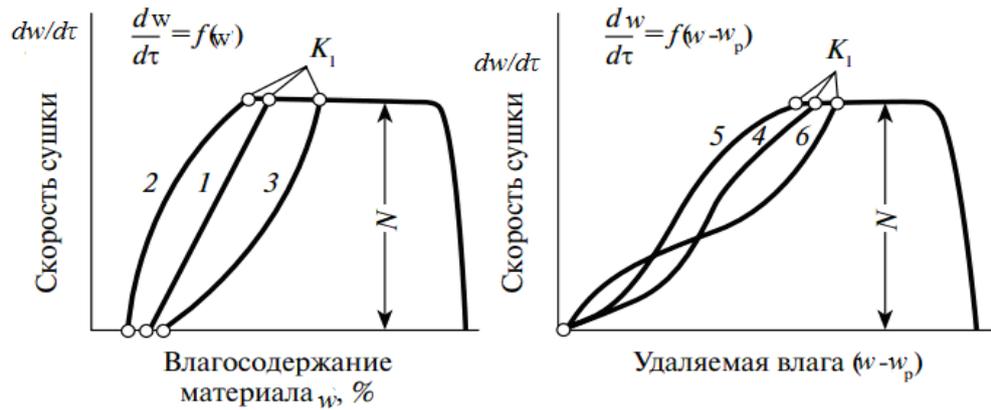


Рисунок 6– Кривые скорости сушки

Источник: составлено автором по данным [131, 97, 1, 28]

Г. К. Филоненко предложил уравнение кривой скорости сушки [3]:

$$-\frac{1}{N} \times \frac{dw_{\text{вл.п}}}{d\tau} = \frac{(w_{\text{вл.п}} - w_p)^n}{A + B(w_{\text{вл.п}} - w_p)^n}, \quad (6)$$

где $w_{\text{вл.п}}$ – среднее влагосодержание продукта, кг/кг;

w_p – равновесное влагосодержание, кг/кг;

N – скорость сушки в первом периоде, с^{-1} ;

n – постоянная, зависящая от свойств продукта;

A, B – постоянные, определяемые экспериментально.

В основу расчета кинетики сушки *Б. С. Сажин, В. А. Реутск* предложили уравнение массопередачи [55, 87]:

$$\frac{dw_{\text{вл.п}}}{d\tau} = -K_{\text{ск}} \times (w_{pA} - w_{\text{вл.п}}) \times (w_{\text{вл.п}} - w_{pB}), \quad (7)$$

где $K_{\text{ск}}$ – эффективный коэффициент скорости сушки;

w_{pA} – равновесные значения влагосодержания в начале сушки, кг/кг;

w_{pB} – равновесные значения влагосодержания в конце сушки, кг/кг.

1.3.3 Температурные кривые сушки

Температурные кривые впервые введены *А.В. Лыковым* [53, 54]. Для анализа процесса сушки продуктов необходимо определить характер изменения температуры продукта T в зависимости от его влажности W .

На рисунке 7 приведены примеры конвективной сушки продуктов разной толщины. При конвективной сушке, в начале процесса, т. е. в период прогрева, температура поверхности продукта повышается от начальной до температуры мокрого термометра (t_m).

В первый период сушки, вся теплота, подведенная к продукту, расходуется на испарение влаги, и температура продукта будет равна температуре испаряющейся жидкости (t_m). Этот период характеризуется постоянной температурой поверхности продукта и равной температуре испарения жидкости со свободной поверхности ($\theta = T_m$).

Начиная с первой критической точки во второй период процесса сушки, скорость испарения влаги с поверхности продукта, а его температура повышается ($\theta > T_m$). Когда влажность продукта достигает величины равновесной влажности (скорость влагоотдачи равна нулю), температура продукта становится равной температуре воздуха ($\theta = T_v$).

В первый период сушки если влага внутри тонкого продукта перемещается в виде жидкости, то температура продукта остается везде одинаковой и близка к температуре мокрого термометра t_m (кривая 1 на рис. 7). Температура поверхности толстого продукта равна t_{2m} , а в центре она меньше t_m , то есть в первый период сушки в продукте имеется градиент температуры. Влагосодержание продукта материала асимптотически стремится к равновесному значению, соответствующему температуре и влагосодержанию сушильного агента.

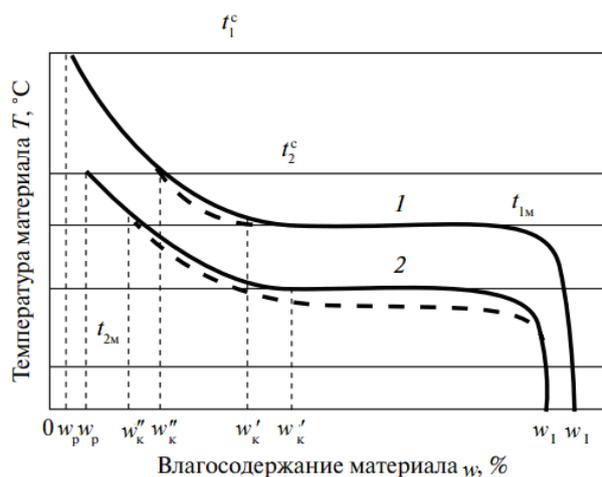


Рисунок 7 – Температурные кривые

Источник: составлено автором по данным [53, 54]

1.4 Анализ современных конструкций сушилок казеина и методики расчета

Для эффективного проведения процесса сушки молочных и белковых продуктов применяют разнообразные современные высокоинтенсивные сушилки. По способу подвода теплоты к высушиваемому продукту различают следующие виды сушки: конвективная сушка; контактная сушка; радиационная сушка; диэлектрическая сушка и сублимационная сушка.

В молочной промышленности применяют разнообразные сушилки для сушки молока, казеина и других молочных продуктов, например, ленточные сушильные аппараты; сушилки с кипящим слоем; сушилки с виброкипящим слоем; сушилки с фонтанирующим слоем; распылительные сушилки и вакуумные сублимационные установки [92,45]. Подробное описание принципа работы сушильных аппаратов и их классификация приводится в специальной литературе [46, 86, 73, 80, 101, 78, 79].

1.4.1 Ленточные установки

Принципиальная схема многоярусной ленточной установки представлена на рисунке 8. Продукт загружается транспортером (2), на транспортере установлен раскладчик (1), влажный воздух удаляется через вытяжные камеры (3) с помощью осевых вентиляторов (4),

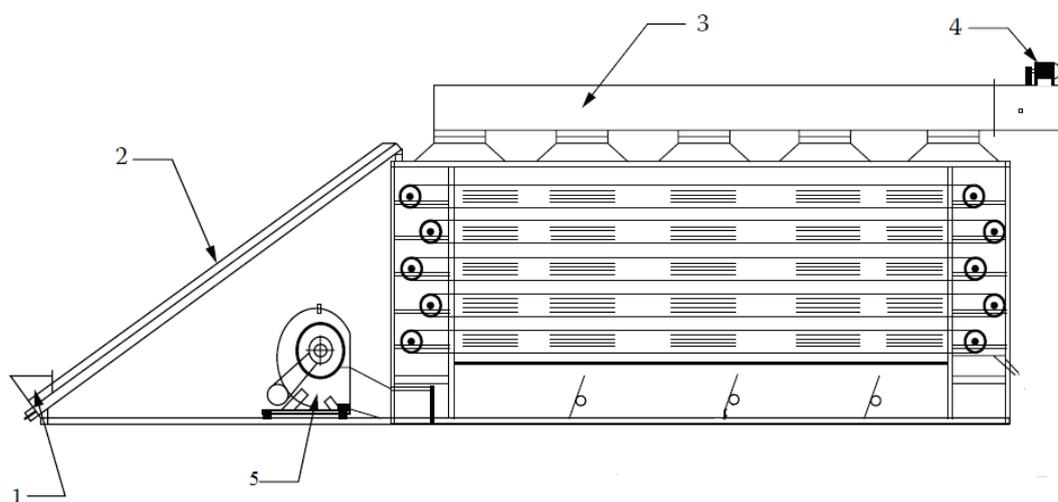


Рисунок 8 – Принципиальная схема многоярусной ленточной установки

Источник: составлено автором

Для выполнения расчета установки рассматриваются следующие параметры и величины [1, 2, 3, 4, 5]:

- в сушилку поступает продукт влажностью (процент) w_0 ; температура теплоносителя (градус) на входе в сушилку t_2 и на выходе из нее t_1 ; начальная температура продукта t_n градус; дисперсный состав продукта \bar{d} , м; коэффициент формы f ;

- параметры атмосферного воздуха, поступающего в калорифер: температура t_1 , градус; относительная влажность φ_0 (процент); влагосодержание x_1 , кг/кг; производительность (кг/ч) по высушенному G_2 или влажному G_1 продукту. Конечная влажность сухого продукта $w_{c.n}$; количество испаренной влаги с продукта W (кг/ч); производительность сушилки по влажному продукту G_1 (кг/ч); производительность сушилки по испаренной влаге с продукта W (кг/ч); влагосодержание

воздуха x_2 в любой точке сушильной камеры равно влагосодержанию $x_3(\tau)$ воздуха на выходе из камеры; энтальпия атмосферного воздуха (теплосодержание) (кДж/кг), поступающего в калорифер I_1 и на выходе из аппарата I_2 ; удельный расход теплоты q (кДж/кг); расход теплоты в сушилке Q (кВт); удельный расход атмосферного воздуха l (кг/кг); расход сухого воздуха L (кг/ч); количество теплоты, переданное от горячего воздуха к продукту Q_p (Вт).

Объемный расход воздуха [2, 3]:

$$V = L \times \bar{v}_{уд}, \quad (8)$$

где $\bar{v}_{уд}$ – удельный объем воздуха, м³/кг.

Масса продукта в установке [2]:

$$m = \left| \frac{G_1 + G_2}{2} \times \tau_{пр}, \quad (9)$$

где $\tau_{пр}$ – время пребывания продукта в аппарате.

Удельная нагрузка продукта при сушке на одну ленту, кг/м² [2, 3]: $gs = m/S$

Рабочую поверхность ленты (м²) можно определить [2, 3]:

$$S_1 = \frac{V}{3600v}, \quad (10)$$

где v – скорость теплоносителя, м/с.

Высоты слоя продукта на ленты:

$$H_{сл} = \frac{gs}{\rho_n}, \quad (11)$$

где $\bar{\rho}_n$ – насыпная плотность продукта, кг/м³.

Гидравлическое сопротивление слоя продукта в процессе сушки [1,2]:

$$\frac{\Delta p}{H_{сл}} = \frac{s^2 \times \mu \times K \times v}{\varepsilon_{сл}^3} + \frac{s \times \rho_v \times K_n \times v^2}{2\varepsilon_{сл}^3}, \quad (12)$$

где μ – коэффициент динамический вязкости воздуха, Па·с;

ρ_v – плотность воздуха, кг/м³;

$\varepsilon_{сл}$ – порозность слоя продукта;

K – константа Козени–Кармана;

K_n – константа.

Общая длина ленты [2, 3]:

$$l_{\text{лп}} = \frac{S}{b}, \quad (13)$$

где b – ширина слоев материала на ленте, м.

$$\text{Число лент} \quad n = \frac{S}{S_1} = \frac{l_{\text{лп}}}{l_1}, \quad (14)$$

где l_1 – длина рабочей части одной ленты, м.

Скорость одной ленты [2, 3]:

$$v_{\text{лп}} = \frac{l_{\text{лп}}}{\tau_{\text{лп}}}, \quad (15)$$

Для определения коэффициента теплообмена (теплодачи) в неподвижных слоях продукта можно использовать формулу В.Н. Тимофеева[2]:

$$Nu = 0,106 \times Re, \quad 20 < Re < 200, \quad (16)$$

$$Nu = 0,61 \times Re^{0,67}, \quad Re > 200. \quad (17)$$

В работе [58] представлены следующие формулы:

$$Nu_m = A \times Re^n \times S \times c^{1/3}, \quad (18)$$

$$Nu_m = \frac{\beta \times d_3}{D}, \quad (19)$$

где D – коэффициент диффузии влаги в воздухе, кг/(м·с·Па);

β – коэффициент массообмена, кг/(м²·с·Па).

$$Re = \frac{v_3 \times d_3}{\nu}, \quad (20)$$

где v_3 – скорость скольжения потока: $v_3 = \frac{v}{\varepsilon}$, $d_3 = \frac{4\varepsilon}{[s_0 \times (1-\varepsilon)]}$.

Применение многоярусной ленточной установки обусловлено рядом достоинств [1, 2, 3, 4]:

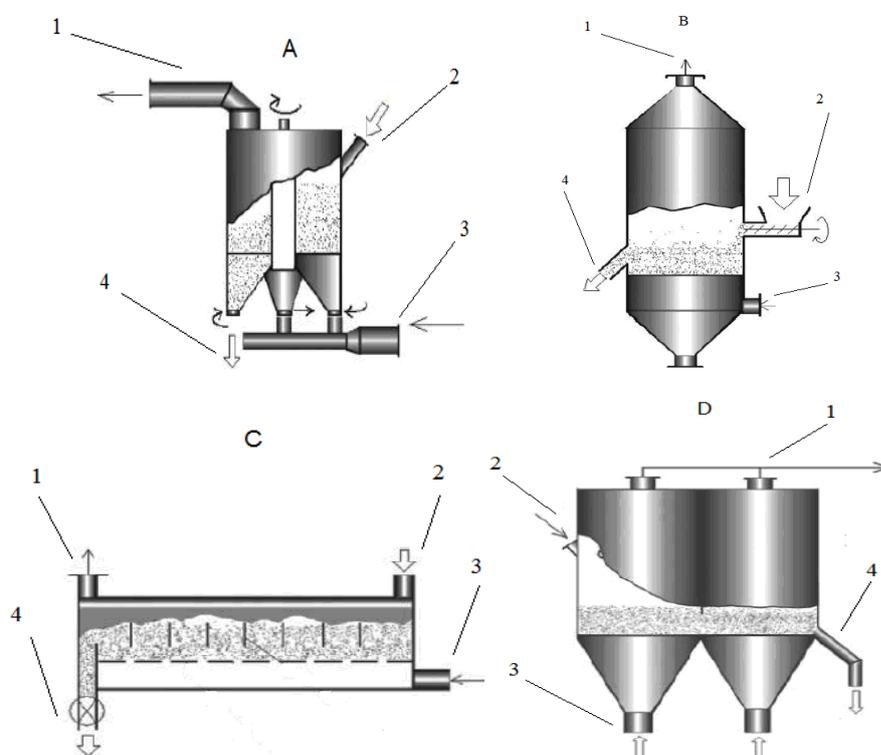
- большая производительность установки;
- возможность изменения режима работы сушки в зависимости от технологических свойств продукта.

Недостатки установки: сложность обслуживания; большой расход сушильного агента и большой расход теплоты на нагревание сушильного агента.

1.4.2 Установки с кипящим слоем

Сушка пищевых продуктов в сушилках кипящего слоя широко используется в пищевой промышленности [147, 121, 154, 100, 144].

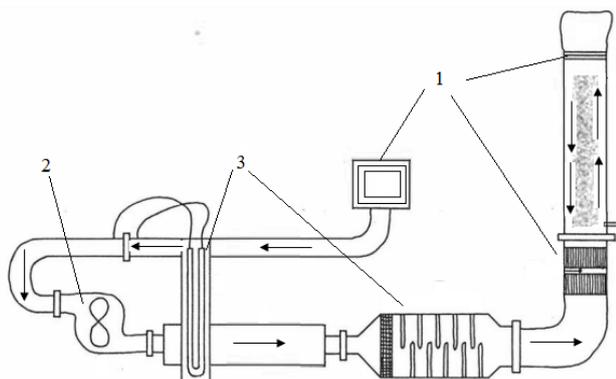
Сушилки псевдооживленного слоя различных модификаций представлены на рисунках 9 и 10. Влажный продукт подается в сушилку через патрубок, воздух поступает в камеру под газораспределительную решетку через входной патрубок образует псевдооживленный слой, отработанный воздух удаляется из сушилки через патрубок в пылеулавливающее оборудование.



A – полунепрерывная сушилка с псевдооживленным слоем; *B* – схема односекционной сушилки с ненаправленным и направленным движением продуктов; *C* – схема односекционной сушилки с кипящим слоем прямоугольного сечения; *D* – схема многосекционного аппарата с кипящим слоем: 1 – патрубок вывода отработанного теплоносителя; 2 – патрубок ввода влажного продукта, 3 – входной патрубок теплоносителя, 4 – патрубок ввода высушенного продукта

Рисунок 9 – Сушилки с кипящим слоем

Источник: составлено автором по данным [147, 121, 154, 100, 144]



1 - воздушный фильтр, 2 - вентилятор, 3 - электронагреватель, 4 - нагревательная камера

Рисунок 10 – Схема аппарата с кипящим слоем для сушки казеина

Источник: составлено автором по данным [112]

Г.К. Филоненко, М.А. Гришин и В.Қ. Қоссек [19] изучали процесс сушки казеина в кипящем слое. Опыты проводились на лабораторной установке при температуре воздуха от 50 °С до 120 °С, скорости воздуха от 0,5 до 5 м/сек, удельной нагрузке от 5,8 до 35,2 кг/м². Начальная влажность казеина была в пределах от 160 % до 180 % (в расчете на массу сухого вещества).

На основе проведенных исследований выполнен расчет и разработан технический проект промышленной сушилки для сушки казеина в кипящем слое. Схема сушилки показана на рисунке 11.

Сушильная камера прямоугольного поперечного сечения разделена продольной перегородкой на две равные части, в каждой из которых установлены два барабана, на которые натянута замкнутая лепта сетка. Высушиваемый материал подается на сетку дозатором. Для создания осциллирующего режима сушки попеременно подается нагретый или холодный воздух в правую или левую части сушильной камеры, причем нагрев материала происходит в кипящем, а охлаждение в плотном слое.

В верхней части сушильной камеры расположена сетка, ограничивающая по высоте рабочий объем камеры и предназначенная для задержки взвешенных частиц материала.

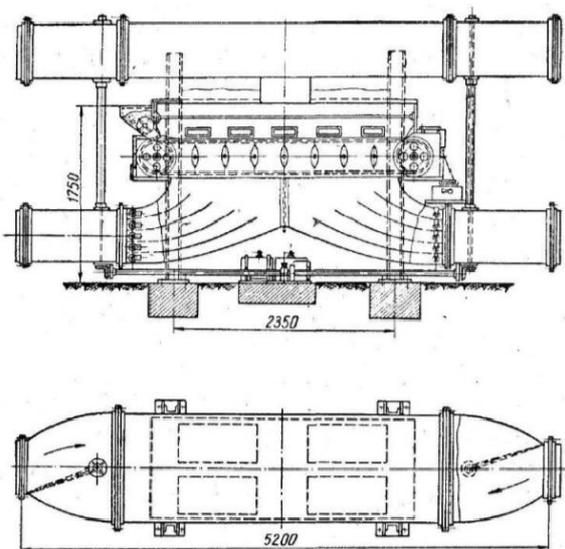


Рисунок 11 – Схема установки для сушки казеина в кипящем слое

Источник: составлено автором по данным [19]

Критическую скорость псевдооживления можно рассчитывать [89, 2]:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (21)$$

где $Ar = \frac{g \times \bar{d}_s^3 \times (\bar{\rho}_n - \bar{\rho}_b)}{\bar{\nu}^2 \times \bar{\rho}_b}$;

$\bar{\rho}_n = (\rho_{n1} - \rho_{n2})/2$ – средняя плотность продукта, кг/м³;

$\bar{\rho}_b$ – средняя плотность воздуха в слое, кг/м³;

$\bar{\nu}$ – кинематическая вязкость воздуха (м²/с) в слое;

d_s – диаметр частиц (м).

Критическую скорость псевдооживления:

$$v_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{Ly_{\text{кр}} \times \bar{\nu} \times g \times \bar{\rho}_n}{\bar{\rho}_b}} \text{ или } v_{\text{кр}} = \frac{\text{Re}_{\text{кр}} \times \bar{\nu}}{\bar{d}_s}. \quad (22)$$

где Ly – критическое значение критерия *Лященко*: $Ly_{\text{кр}} = \frac{\text{Re}_{\text{кр}}^3}{Ar}$.

Скорость потока воздуха определена для рабочей площади решетки $v = K \times v_{\text{кр}}$.

Вследствие более высокой температуры скорость газа непосредственно у решетки:

$$v_{\text{реш}} = v \times \frac{t_2 + 273}{t_3 + 273}. \quad (23)$$

где t_2 – температура теплоносителя на входе в сушильный аппарат (градус);

t_3 – температура теплоносителя на выходе из аппарата (градус).

Число псевдооживления:

$$K = \sqrt[3]{\frac{Ly}{Ly_{\text{кр}}}}. \quad (24)$$

Число псевдооживления (K) для крупных размеров частиц $K = 2 - 3$, для мелких $K = 10 - 15$ и более.

Для сильно полидисперсных высоковлажных продуктов, скорость псевдооживления, где $Fe = \sqrt[3]{4Ar/3}$ – критерий Федорова ($Fe = 5-55$).

Скорость влажного воздуха в отверстиях решетки $v_{\text{отв}} = f_{\text{ж}} \times v_{\text{реш}}$, где живое сечение решетки составляет (2 % - 10 %), $f_{\text{ж}} = \sum S_{\text{отв}} / S_{\text{реш}}$, $v_{\text{кр.отв}} = v_{\text{отв}} / K$.

Значение (K) число псевдооживления можно принять ($K = 2 - 3$) тогда:

$$Ly_{\text{кр.отв}} = \frac{v_{\text{кр.отв}}^3 \times \rho_{\text{в}}}{\bar{v} \times g \times \rho_{\text{п}}}. \quad (25)$$

Максимальный диаметр частиц

$$d_{\text{max}} = \sqrt[3]{\frac{A \times r \times v^2 \times \rho_{\text{в}}}{g \times \rho_{\text{п}}}}. \quad (26)$$

Площадь решетки

$$S_{\text{реш}} = \frac{L \times v_{\text{уд}}}{3600 \times v}, \quad (27)$$

где $v_{\text{уд}}$ – удельный объем воздуха, м³/кг.

В первый период скорости сушки коэффициент теплоотдачи можно определять по формулам [18]:

$$Nu = 1,6 \times 10^{-2} \times \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{1,3} \times Pr^{0,33} \text{ при } \frac{Re}{\varepsilon} \leq 200, \quad (28)$$

$$Nu = 0,4 \times \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{0,67} \times Pr^{0,33} \text{ при } \frac{Re}{\varepsilon} \geq 200. \quad (29)$$

где ε – средняя порозность слоя (0,55 - 0,7);

$Pr = \bar{\nu} / \bar{a}$ – число *Прандля*;

$Re = \nu \times \bar{d}_3 / \bar{\nu}$ – число *Рейнольдса*;

$\bar{\nu}, \bar{a}$ – коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности воздуха при средней их температуре $t = 0,5 \times (t_2 + t_3)$, м²/с.

Средняя разность температуры теплоносителя и частиц в слоях продукта [2]:

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_2 - t_3}{\ln \frac{t_2 - t_n}{t_3 - t_n}}, \quad (30)$$

где \bar{t}_n – средняя температура частиц в слоях продукта, °С;

t_2 – температура теплоносителя на входе в сушильный аппарат, °С;

t_3 – температура теплоносителя на выходе из аппарата, °С.

Количество теплоты, переданное от воздуха к продукту в слое [2, 3]:

$$Q = Q_{исп} + Q_n + Q_d, \quad (31)$$

где Q_d – расход теплоты на дегидратацию влаги, Вт;

$Q_{исп}$ – расход теплоты на испарение влаги, Вт;

Q_n – расход теплоты на нагревание продукта, Вт.

Объем слоя продукта в сушильной камере [2, 3]:

$$V_{сл} = \frac{Q}{\alpha \times s_0 \times (1 - \varepsilon) \times \Delta t_{cp}}, \quad (32)$$

где $\alpha = Nu \times \bar{\lambda} / \bar{d}_3$;

$\bar{\lambda}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт / (м·К);

$s_0 = 6f / \bar{d}_3$ – удельная поверхность частиц, м⁻¹;

f – коэффициент формы частицы.

Высота слоя [2, 3]:

$$H_{сл.р} = \frac{V_{сл}}{S_{реш}}. \quad (33)$$

Гидравлическое сопротивление слоя продукта [2]

$$\Delta p_{сл} = \rho_n \times (1 - \varepsilon) g \times H_{сл}. \quad (34)$$

Сопротивление перфорированной решетки [2,3]:

$$\Delta\rho_{\text{реш}} = 2 \times \frac{\rho_{\text{в}} \times \bar{v}^2}{2}, \quad (35)$$

Общая высота сушилки над газораспределительной решеткой принимается:

$H_{\kappa} = H_{\text{сл}} + H_{\text{сеп}}$, где $H_{\text{сеп}}$ – высота сепарационного пространства, м.

К основным преимуществам установки относятся [1, 2, 3]:

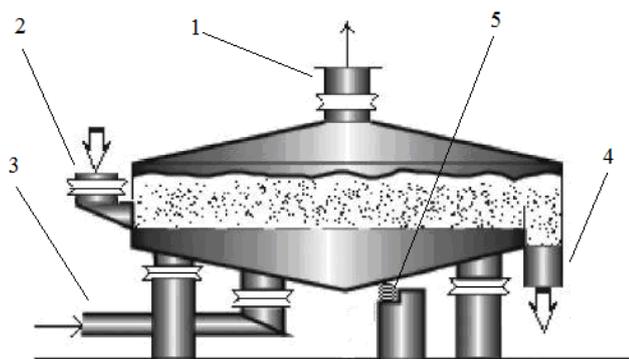
- высокий коэффициент теплоотдачи;
- высокие интенсивность и производительность установки.

Недостатки установки [1, 2, 3]:

- высокая вероятность уноса перемешенного продукта;
- большой расход электроэнергии.

1.4.3 Установки с виброкипящим слоем

Сушка пищевых продуктов в сушилках с виброкипящим слоем характеризуется высокой интенсивностью. Установки с виброкипящим слоем позволяют осуществлять процесса сушки плохоожижаемых продуктов, интенсифицируют теплообмен, обеспечивают более равномерное время пребывания частиц в слое и меньшие энергозатраты [110,109,2]. На рисунке 12 представлена схема установки с виброкипящим слоем.



1 – патрубок для вывода отработанного теплоносителя, 2 – патрубок для ввода влажного продукта, 3 – входной патрубок теплоносителя, 4 – патрубок для вывода высушенного продукта, 5 – пружины

Рисунок 12 – Схема установки с виброкипящим слоем

Источник: составлено автором по данным [110, 109, 2]

Исходный влажный материал загружается через патрубок в камеру, под воздействием вибрации, горячий технологический воздух, поступивший через патрубки, в результате интенсивного теплообмена между теплоносителем и частицами осуществляется его сушка. Дисперсный продукт, находящийся на перфорированной решетке с воздухом, переходит в псевдооживженное состояние при условии [2, 3]:

$$\omega_0 = \frac{A \times \omega^2}{g} \frac{\sin \phi_1}{\cos \phi_2} + \frac{F_B \times \sin \phi_3}{m_{\text{сл}} \times g \times \cos \phi_2} + \frac{F_A}{m_{\text{сл}} \times g} = K \geq 1, \quad (36)$$

где A – амплитуда колебаний (2–10) мм, и виброускорения;

$S_{\text{сл}}$ – площадь слоя продукта, м²;

ω – круговая частота колебаний, рад/с $\omega = 2\pi \times f$ (f – частота вибраций, Гц) 5–60 Гц;

$F_B = S_{\text{сл}} \times \Delta p$ – сила, действующая со стороны теплоносителя, кг·м/с²;

Δp – изменение давления теплоносителя в слоях, Па;

$F_A = V_M \times \rho \times g$ – сила Архимеда, кг·м/с²;

V_M – общий объем частиц в слоях продуктов, м³.

$m_{\text{сл}}$ – масса слоев продукта, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 – угол между направлением вибраций и рабочей решеткой, угол наклона рабочей решетки к горизонту и угол между направлением силы F_B и рабочей решеткой, град.

Для обеспечения режима режим ω_0 непрерывного подбрасывания при условиях $\omega_0 = \sqrt{\pi^2 \times b^2 + 1}$, режим вибраций частиц имеет вид:

$$\omega_0 = \frac{A \times \omega^2}{g} \frac{\sin \phi_1}{\cos \phi_2}, \quad (37)$$

где b – число периодов колебаний.

В работе [74] предложили формулу для определения скорости начала псевдооживжения (высота слоя менее 60 мм):

$$v_n = 0,12 \times \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}} \right)^{0,63} \times \left(\frac{1}{v_{\text{в}}} \right)^{0,33} \times d_3^{0,88} \times \left(1 - 0,095 \frac{A \times \omega^2}{g} \right). \quad (38)$$

где $\rho_в$ – кажущаяся плотность продукта, кг/м³;

$\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м³;

$d_э$ – средний эквивалентный диаметр частиц, м.

Порозность слоя частиц имеет вид:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} = 1 - \exp[-0,96 \times (v - v_{н})^{0,4}] \quad (39)$$

где ε – порозность виброкипящего слоя;

ε_0 – порозность неподвижного слоя;

v – скорость воздуха, м/с.

Сопротивление Δp_n (Па) слоя в начале псевдооживления [69]:

$$\Delta p_n = \Delta p_0 \times \left(\frac{A \times \omega^2}{g} \right)^{-n}, \quad (40)$$

где Δp_0 – перепад давления в слое в начале псевдооживления при отсутствии вибраций, Па.

Параметр n можно определить $n = 0,41 + 0,196 d_э \rho_{п}$.

Сопротивление Δp (Па) виброкипящего слоя [86]:

$$\Delta p = 84,1 + 0,321 \times \frac{v \times m_{сл}}{S_{сл}} - 17,9 \times v \times A + 96,4 \times v^2 - 2,7 \times v \times Fe + 67,9 \times v \times N, \quad (41)$$

При скорости теплоносителя $v \geq v_{кр}$:

$$\Delta p_{кр} = 9,81 \times (R_{кр} - 0,022 \times A) \times \frac{m_{сл}}{S_{сл}}, \quad (42)$$

где $v_{кр}$ – критическая скорость теплоносителя, м/с;

$R_{кр}$ – отношение сопротивления слоев продукта к удельной нагрузке на неподвижной решетке;

$N = 0$ при $A = 0$ и $N = 1$ при $A \neq 0$;

Fe – число Федорова имеет вид:

$$Fe = d_э \times \sqrt[3]{\frac{4}{3} \times \frac{g}{v_{в}^2} \times \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{в}} - 1 \right)}, \quad (43)$$

Критическую скорость воздуха можно определить: $Re_{кр} = 0,027 \times Fe^{1,9}$, где

$$Re_{кр} = v_{кр} \times d_э / v_{в}.$$

Для определения средней скорости перемещения u (м/с) продукта (без продувки воздухом) используется уравнение [54]:

$$u = k \times \omega \times A \times \cos \phi_2 \sqrt{1 - K^{-2}}, \quad (44)$$

где k – постоянный коэффициент.

Для расчета массоотдачи в первом периоде сушки можно воспользоваться формулой [86]:

$$Nu_m = 5,03 \times 10^{-5} \times \left(\frac{Re}{1 - \varepsilon} \right)^{0,4} \times \frac{A \times \omega^2}{g}. \quad (45)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи используется уравнение [9]:

$$Nu = 0,497 \times Re^{0,659} \times Gu^{0,154} \times \left(\frac{d_3}{A} \right)^{-0,053}. \quad (46)$$

Диапазон изменения чисел: $23,6 \leq Nu \leq 47,7$, $537 \leq Re \leq 1235$, $0,115 \leq Gu \leq 0,171$, $0,345 \leq d_3, A \leq 1,38$;

К основным преимуществам установки с виброкипящим слоем относятся [2, 3]:

- высокая интенсивность;
- установки с виброкипящим слоем позволяют осуществлять процесса сушки плохоожижаемых продуктов, интенсифицируют теплообмен;
- установка обеспечивает более равномерное время пребывания частиц в слое и меньшие энергозатраты.

Недостатки установки [1,2,3]:

- высокая вероятность уноса перемешенного продукта,
- большой расход электроэнергии.

1.4.4 Установки с фонтанирующим слоем

В фонтанирующем слое можно сушить как сыпучие материалы, так и пасты, и растворы. Техника фонтанирующего слоя успешно используется для сушки псевдоожижаемых зернистых пищевых продуктов. Такая техника позволяет уве-

личить время прерывания высушиваемого продукта в аппарате и повысить степень его сушки. На рисунках 13 и 14 показаны цилиндрикоконические и конические сушильные аппараты. Фонтанирующий слой в аппаратах образуется при вводе теплоносителя через нижнее основание части снизу - вверх.

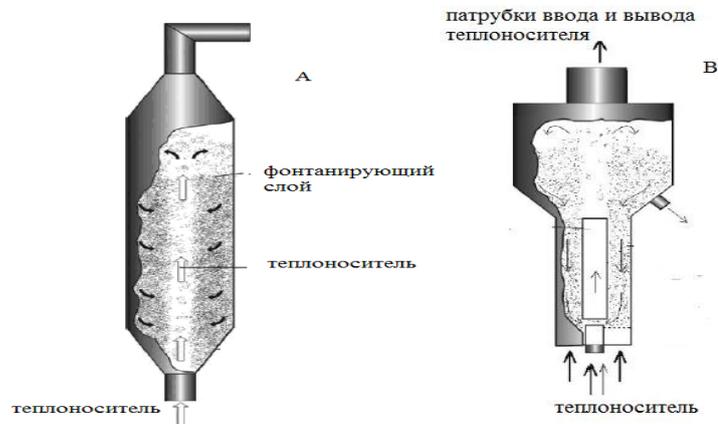
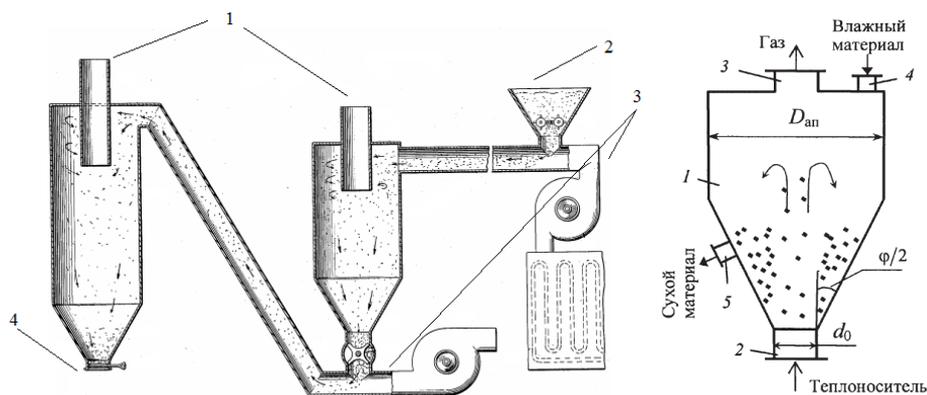


Рисунок 13 – Цилиндрикоконические и конические аппараты с фонтанирующим слоем

Источник: составлено автором по данным [140]



1 – патрубок вывода отработанного теплоносителя, 2 – патрубок ввода влажного продукта, 3 – входной патрубок теплоносителя, 4 – патрубок ввода высушенного продукта, 5 – пружины.

Рисунок 14 – Схема аппарата с фонтанирующим слоем для сушки казеина

Источник: составлено автором по данным [2]

Суть такого метода сушки заключается в том, что вводят влажный материал при прохождении теплоносителя через патрубок (2), и создании псевдожидкого кипящего слоя, состоящего из твердых частиц, или инертного носителя в цилиндрикоконической камере (1).

Высушенный материал выгружается через патрубок (5). Особенностью аппарата с фонтанирующим слоем является наличие циркуляционного движения материалов и создание вертикальных зон локального фонтанирования.

Скорость начала и конца устойчивого фонтанирования можно определить по формулам [2, 85]

$$v_{н.ф} = \frac{Re_{н.ф} \times v_1}{d_3}, v_{к.ф} = \frac{Re_{к.ф} \times v_1}{d_3}, \quad (47)$$

где $v_{н.ф}, v_{к.ф}$ – скорость начала и конца устойчивого фонтанирования, м/с;
 v_1 – кинематическая вязкость теплоносителя, м²/с.

Для конических и цилиндрических аппаратов [2, 3, 85]

$$Re_{н.ф} = 0,706 \times Re_{вит} \times \left(\frac{D}{d_0} - 1 \right)^{0,82} \times \left(t \times g \times \frac{\varphi}{2} \right)^{0,1}, \quad (48)$$

$$Re_{к.ф} = 0,176 \times Re_{вит} \times \left(\frac{D}{d_0} - 1 \right)^{-0,087} \times \left(\frac{H_{ап}}{d_0} \right)^{0,6} \times \left(\frac{D_{ап}}{d_0} \right)^{0,94} \times \left(t \times g \times \frac{\varphi}{2} \right)^{-0,323}, \quad (49)$$

$$Re_{вит} = v_{вит} \times d_3 / v_1, \quad (50)$$

где $H_{ап}$ – высота сушильного аппарата, м;

$D_{ап}$ – диаметр аппарата, м;

$Re_{вит}$ (20 – 2460) – число Рейнольдса;

D, d_0 – диаметр верхнего слоя и нижнего сечения камеры, м;

φ – угол раствора конуса (30 – 50), град;

$v_{вит}$ – скорость витания частиц, м/с.

Для тангенциального ввода воздуха в прямоугольный аппарат [88]

$$Re_{н.ф} = 11,3 \times Re_{вит} \times \Gamma^{-0,8}, Re_{к.ф} = 50,9 \times Re_{вит}^{-0,8} \times \Gamma^{-0,8}, \quad (51)$$

где Γ – тангенциальный ввод воздуха, $\Gamma = 0,7 / (3,9 \times 10^{-3} \times A\Gamma^{0,445} + 1,1)$.

Диаметр нижнего сечения сушильного аппарата:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \times V}{3600 \times \pi \times v_1}}, \quad (52)$$

где v_1 – скорость теплоносителя в нижнем сечении конического сушильного аппарата;

V – объемный расход горячего воздуха, м³/ч.

Объем неподвижного слоев продукта в аппарате [85]:

$$V_{\text{сл}} = \frac{\tau_{\text{пр}} \times (G_1 + G_2)}{2 \times \bar{\rho}_H}, \quad (53)$$

где ρ_H – средняя насыпная плотность продукта, кг/м³;

$\tau_{\text{пр}}$ – среднее время пребывания продукта в сушильном аппарате, ч;

G_1 – производительность установки по влажному продукту, кг/ч;

G_2 – производительность установки по высушенному материалу, кг/ч.

Максимальную высоту неподвижного слоя материала в камере (способного фонтанировать) [85]:

$$\frac{H_{0\text{max}}}{d_0} = 0,06 \times \left(\frac{H_{\text{ап}}}{d_0} \right)^{0,66} \times \left(\frac{D_{\text{ап}}}{d_0} \right)^{1,0} \times \left(t \times g \times \frac{\varphi}{2} \right)^{-1,15}, \quad (54)$$

К основным преимуществам установки относятся расширение поверхности контакта фаз и высокий коэффициент теплообмена, что обуславливает повышение эффективности процесса, экономичность, интенсивность и производительность установки; возможность регулирования времени пребывания казеина в слое за счет изменения его высоты и снижение затрат энергии [2, 3, 4, 5].

Недостатки установки: вероятность уноса и обратного перемешивания казеина; возникновение гидродинамической неустойчивости в зависимости от свойств продукта; низкая допустимая степень полидисперсности; неравномерность сушки (неравномерность пребывания частиц в слое), что приводит либо к уменьшению интенсивности сушки, либо к перегреву казеина; усложнение конструкции; ограничения по температуре подаваемого теплоносителя; и низкая производительность, сложность масштабного перехода при увеличении производительности и длительности процесса сушки.

Выводы по первой главе

– Рассмотрены вопросы современной техники и технологии производства казеина. Способы производства: осаждение кислотой (минеральное осаждение,

внесение закваски и осаждение кислой сывороткой); коагуляция сычужным ферментом; копреципитаты; казеинаты.

– Рассмотрены теоретические основы процесса сушки тепло и массообмена, кинетика сушки пищевых продуктов (кривые скорости, температурные кривые).

– Проведен анализ современных конструкций сушилок казеина и методики расчета ленточных установок; установок с кипящим слоем; установок с виброкипящим слоем; и установок с фонтанирующим слоем.

Глава 2 Системный анализ и моделирование радиационно-конвективной сушки казеина

Эффективность процесса сушки казеина обуславливается влиянием множества параметров и факторов: характеристика сушильного аппарата, физико-химические свойства влажного продукта и качество готового продукта [103, 25].

Современная наука о моделировании и оптимизации процессов производства и сушки казеина, использует в большинстве случаев экспериментальные методы исследований, базирующиеся на выборе разных комбинаций параметров режима сушки. Процесс сушки казеина является наиболее сложным тепломассообменным процессом, сосредоточившим в себе перенос теплоты и влаги, физико-химические и реологические изменения.

Основу процесса сушки казеина составляют технологические параметры режима обработки, физико-химические и структуро-механические процессы в продукте. Именно эти параметры и технологические показатели позволяют получить сухой казеин с присущими ему технологическими свойствами [145, 146, 159]. Поэтому для решения задачи моделирования и оптимизации процесса сушки казеина с прогнозированием его качества необходимо рассматривать процесс как многоуровневую иерархическую структуру, состоящую из взаимосвязанных между собой элементов и явлений. Для этого использован системно-аналитический подход к исследованию процесса сушки казеина [150, 26].

2.1 Физическая модель процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве

Физика процесса сушки кислотного казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве заключается в воздействии тепловых потоков ИК - генератора и потока горячего воздуха на объект сушки (казеин). Интенсивность изменения процессов тепломассообмена и их коэффициентов зависят от

следующих параметров режима сушки: мощности инфракрасного источника, длины волны ИК-излучения, плотности лучистого потока, температуры горячего воздуха, влагосодержания воздуха, скорости воздуха, влагосодержания и температуры продукта. Физическая сущность процесса сушки казеина зависит от процессов тепломассообмена, которые характеризуются основными параметрами переноса: коэффициентов теплопроводности, коэффициентов влагопроводности, коэффициентов теплопроводности, коэффициентов фазового превращения [168, 174, 66, 59, 67, 84].

На рисунке 15 показана физическая модель процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве:

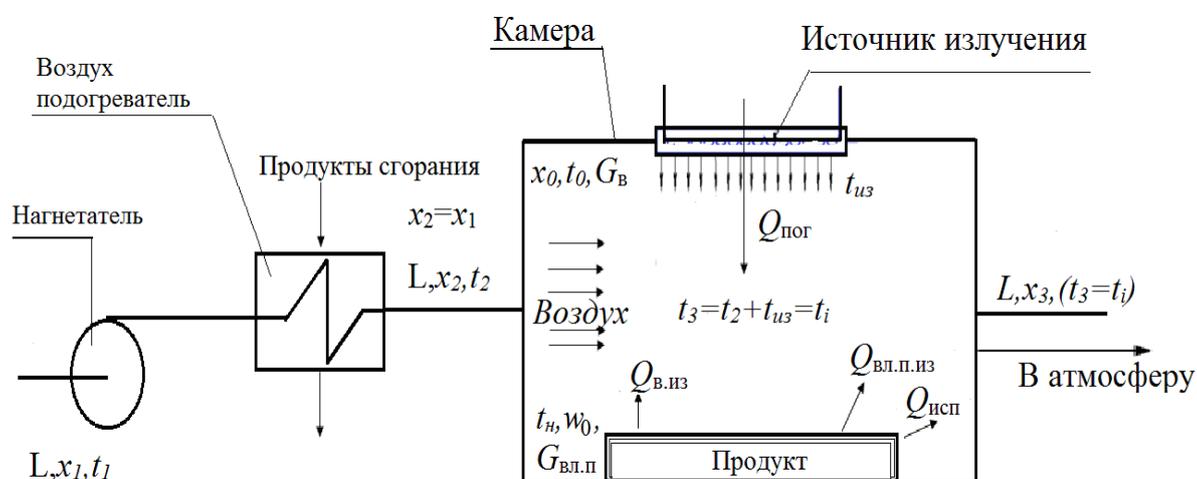


Рисунок 15 – Физическая модель процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве

Источник: составлено автором

Для разработки физической модели сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве предполагали [71, 72, 73, 74, 75]:

– внутренняя площадь поверхности ограждений сушильной камеры ($S_{\text{ап}}$), м^2 ;

– в камере находится n влажного казеина в форме пластины толщиной (R) м, с начальным влагосодержанием (w_0) кг/кг и начальной температурой ($t_{\text{н}}$) градус;

– масса влажного казеина в камере ($G_{\text{вл.п}} = V_{\text{вл.п}} \times \rho_{\text{вл.п}}$) кг, где плотность влажного казеина ($\rho_{\text{вл.п}}$) кг/м³, ($V_{\text{вл.п}}$) его объем;

– масса влажного воздуха в камере ($G_{\text{в}} = V_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}}$) кг, где плотность влажного воздуха ($\rho_{\text{в}}$) кг/м³, ($V_{\text{в}}$) его объем ;

– влагосодержание влажного воздуха в камере (x_0) кг/кг, с начальной температурой (t_0), градус;

– влажный воздух, поступающий в камеру, содержит ($L_{\text{в}}$) кг/с, абсолютно сухой воздух ($L_{\text{с}}$) кг/с;

– влагосодержание воздуха перед основным калорифером (x_1) с температурой (t_1), влажный воздух нагревается в наружном калорифере до температуры (t_2) градус и подается в камеру;

– в камере находятся лампы с нихромовой спиралью со степенью черноты окисленного нихрома ($\varepsilon_1 \approx 0,85$), стекла ($\varepsilon_2 \approx 0,82$).

Инфракрасное излучение передается от нагревательных элементов к поверхности казеина, при этом лучистая энергия проникает в казеин и превращается в тепловую, т.е происходит тепло и влагоперенос в камере, на поверхности и внутри казеина [115, 160].

Уравнение теплового баланса теплопереноса при инфракрасном нагреве: [134, 2, 41, 42, 90, 91]:

$$dQ_{\text{пог}} = dQ_{\text{вл.п.из}} + dQ_{\text{исп}} + dQ_{\text{в.из}}, \quad (55)$$

где $dQ_{\text{пог}}$ – тепловой поток, поглощенный казеином при облучении, Дж;

$dQ_{\text{вл.п.из}}$ – расход теплового потока на нагрев казеина, Дж;

$dQ_{\text{исп}}$ – расход теплового потока на испарение влаги с казеина, Дж;

$dQ_{\text{в.из}}$ – потери теплоты нагреваемым казеином в окружающую среду, Дж.

Тепловой поток, поглощенный казеином при облучении за время $d\tau$:

$$dQ_{\text{пог}} = q \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau. \quad (56)$$

При известной плотности теплового потока излучателя ($q_{\text{пад}}$) Вт/м², запишем, тогда

$$dQ_{\text{под}} = \varpi \times q_{\text{пад}} \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau, \quad (57)$$

где ϖ – коэффициент поглощения;

$S_{\text{вл.п}}$ – площадь части казеина облучаемой поверхности, м^2 .

Расход теплоты на нагрев казеина

$$dQ_{\text{вл.п.из}} = G_{\text{вл.п.из}} \times c_{\text{вл.п.из}} \times dt_{\text{вл.п}}, \quad (58)$$

где $G_{\text{вл.п}}$ – масса казеина в камере, кг;

$c_{\text{вл.п}}$ – теплоемкость влажного казеина, Дж/(кг·К);

$dt_{\text{вл.п}}$ – изменение температуры казеина при ИК– излучении, °С.

Расход теплового потока на испарение влаги с казеина

$$dQ_{\text{исп}} = j \times r^* \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau, \quad (59)$$

где j – интенсивность испарения влаги, кг/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$);

r^* – удельная теплота парообразования влаги, Дж/кг.

Потери теплоты нагреваемым казеином в окружающую среду [2, 3, 4]

$$dQ_{\text{в.из}} = \alpha_{\text{общ}} \times (t_{\text{пов.п}} - t_{\text{ок}}) \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau, \quad (60)$$

где $\alpha_{\text{общ}} = \alpha + \alpha_{\text{изл}}$, α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$).

$\alpha_{\text{общ}} = 18 - 24$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$);

$t_{\text{пов.п}}$, $t_{\text{ок}}$ – температуры поверхности казеина и воздуха окружающего казеина.

Теплота, поглощенная продуктом от излучателя (за время $d\tau$) и теплота, подводимая с нагретым воздухом расходуется на и нагрев влажного продуктов, а также теряются в окружающую среду с отработанным воздухом [70, 72, 73, 74].

Температура (t_i) воздуха в любой точке сушильной камеры (температура воздуха перемешивающего и температура нагретшегося воздуха при ИК - излучении) равны температуре влажного воздуха на выходе из установки; влагосодержание воздуха x_2 в конце сушки равно влагосодержанию $x_3(\tau)$ воздуха на выходе из установки [70, 71, 72, 73, 74].

2.2 Разработка системного подхода к структурно-параметрическому анализу процесса сушки казеина

Для решения задачи моделирования и оптимизации процесса сушки казеина с прогнозированием его качества необходимо рассматривать процесс как многоуровневую иерархическую структуру, составить связи между элементами и явлениями, использовать системно-аналитический подход к процессу сушки.

Задачей системно-аналитического подхода процесса сушки казеина и разработки многоуровневой иерархической структуры на разных уровнях, является параметрическое описание и моделирование сушки с выделением показателей качества влажного и сухого казеина; параметров режима сушки; характеристик сушильного аппарата и определение математических зависимостей между ними для оптимизации сушки казеина. Процесс сушки казеина как системы можно описать $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ вектором выходных параметров сушки или $Q(y_1, \dots, y_m)$ критерием оценки состояния процесса (качество влажного казеина и сухого казеина, технологические параметры и режимы сушки, энергетические затраты) [108].

Компоненты вектора выходных параметров сушки (Y) это: $G = \{g_1, \dots, g_r\}$ функции характеристик входного потока; $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ параметры режима и состояния сушки, которые зависят от факторов $V = \{v_1, \dots, v_q\}$ и от $U = \{u_1, \dots, u_p\}$ управляющих воздействий [45, 35]. Для описания изменения состояния процесса сушки казеина используем следующие линейные уравнения [45, 35]:

$$Q(Y) = \sum_{i=1}^m q_i \times \Delta y_i$$

$$\Delta y_i = \sum_{j=1}^{n_x} c_{ij} \times \Delta x_j + \sum_{k=1}^{n_g} d_{ik} \times \Delta g_k, i = \bar{1}, \bar{m}$$

$$\Delta x_i = \sum_{v=1}^{n_v} p_{jv} \Delta v_v + \sum_{\mu=1}^{n_\mu} r_{j\mu} \Delta u_\mu, j = \bar{1}, \bar{n}_x,$$

где $q_i, c_{ij}, d_{ik}, p_{jv}, r_{j\mu} - K$, регрессионные коэффициенты между соответствующими переменными.

В работах [45, 35, 36, 34] была представлена матричная структурно-параметрическая модель системы для описания структуры и характеристик связей между параметрами и факторами, определяющими функционирование технологической системы. Для процесса сушки казеина строится матричная структурно-параметрическая модель (рисунок 16). При этом все изменяемые параметры режима сушки можно записать в безразмерных величинах [45,35]:

$$z_{ij} = \frac{z_{ij}^t - z_{ij}^0}{\Delta z_{ij}^0}, \quad (62)$$

где z_{ij} – j -й параметр i -го множества компонентов (G, U, V, X) и вектор (Y);

z_{ij}^t и z_{ij}^0 – фактическое и нормативное значения j -го параметра в i -м множестве;

Δz_{ik}^0 – допустимое отклонение от нормы.

Для определения критического состояния сушки казеина используется метод аддитивно-мультипликативной свертки [36, 34]:

$$Q = \prod_{k=1}^{m_k} (1 - z_k^2) \cdot \left[\sum_{i=1}^m a_i \left(1 - \sqrt{\sum_{j=1}^{n_j} b_{ij} z_{ij}^2} \right) \right], \quad (63)$$

где z_{ij} – отклонение j -го фактора;

b_{ij} – весовой коэффициент отклонения фактора;

z_k – отклонение k -го фактора критической группы состояния;

a_i – коэффициент значимости факторов.

	Влажный казеин	Технологические параметры режима сушки	Сушильный аппарат	Сухой казеина
Влажный казеин				
Технологические параметры режима сушки				
Сушильный аппарат и конструктивные элементы				
Сухой казеин				

Рисунок 16 – Структурная матричная модель процесса сушки казеина

Источник: Составлено автором

При $\sum_{i=1}^m a_i = 1$ и $\sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} = 1; i = \overline{1, m}$ функционал уравнения (63) изменяется от

(1) до (0), т.е. от эталонного состояния параметров сушки или казеина до его допустимого значения, и при выходе значения любого параметр критической группы за предельно допустимый уровень, функционал уравнения обращается в нуль.

Для определения функционала и весовых коэффициентов используется методика экспертного оценивания [36].

При этом значение функционала качества сухого и влажного казеина градуируется от 1 до 0 от самого высокого казеина до удовлетворительного уровня, например, от 1,0 - 0,8 очень хорошо; 0,8 - 0,3 просто хорошо; 0,3 - 0,1 просто удовлетворительно; 0,1 - 0,0 плохо.

2.3 Иерархическая структура анализа процесса сушки казеина

Для описания и анализа радиационно-конвективной сушки казеина, предлагали иерархическую структуру, состоящую из взаимосвязанных уровней сушки и определили задачи системного подхода в условиях инфракрасного и конвективного нагрева:

Первый уровень составляют изменения, происходящие с фосфолипидами, стеринами, летучими жирными кислотами, свободными амино- и жирными кислотами, витаминами, минеральными веществами [139, 153, 118, 17].

Второй уровень иерархии описывает влияние сушки казеина на его биохимические процессы:

1) третья стадия денатурации белков (нарушение или изменение стабилизирующих сил в нативной структуре) [102].

2) часть белков и свободных аминокислот вступает во взаимодействие с лактозой (происходит частичная реакция *Майяра*) [107, 157, 16].

Третий уровень иерархии описывает процессы и явления, происходящие в структурных элементах творожного сгустка, а именно: изменение конформации структуры белка, переход из третичной структуры в двоичную [166, 167, 40, 43].

Влага выделяется из зерна, просачиваясь через капилляры на его поверхности; снижение водосвязывающей способности (обезвоживания поверхностных слоев и потери массы); изменение структурно-механических свойств (кажущаяся плотность ρ_b , истинная плотность ρ_p , пористость ε) [170, 39, 119, 37, 38].

Четвертый уровень – это явления и эффекты, имеющие место быть в слоях продукта. На данном уровне происходят:

1) тепло-массообменные процессы (интенсивность теплоотдачи на границе, массоотдачи верхнего слоя в среду рабочей камеры, испарение влаги с поверхностных слоев, внутренний тепломассоперенос);

2) фазовые процессы между частями продукта [167].

Пятый уровень составляют процессы, протекающие при сушке в продукте [125, 108, 152]:

- 1) теплообменные (излучение, теплопроводность);
- 2) массообменные (испарение, конденсация, диффузия, массоперенос);
- 3) фазовые процессы (твердая - жидкая - газообразная (пар));
- 4) объемно-физические превращения;
- 5) структурно-механические свойства.

Шестой уровень характеризует нагревательные инфракрасные элементы, теплоноситель, конструкция сушильного аппарата и опытный образец, в основе положен процесс тепло-массообмена, внешний теплообмен между образцом и нагревательными элементами конструкции.

Седьмой уровень иерархии описывает процесс сушки в сушильной камере: взаимосвязь между влажным казеином, источниками ИК-излучения и теплоносителем. Описание процессов и явления на данном уровне, дает возможность рассматривать динамическую обстановку сушки казеина и проанализировать тепло-массообмен в сушильной камере.

В таблице А.1 (приложение А) составлены вербальная модель процесса и анализ взаимосвязанных уровней радиационно-конвективной сушки казеина.

Системный анализ сушки казеина предполагает формализацию описаний процессов тепло-массообмена, объемно-физические превращения и биохимические процессы от макро до микроуровней и интеграцию их в единую математическую модель для определения рациональных режимов и оптимизацию ее работы. При этом модели вышестоящего уровня раскрывают порядок взаимодействия элементов смежного нижестоящего уровня, и поведение каждого элемента подсистем может быть смоделировано как дискретные переходы из одного состояния в другое [152].

Рисунок 17 отражает входные параметры и выходные целевые функции перехода на вышестоящий уровень [136, 58, 10]:

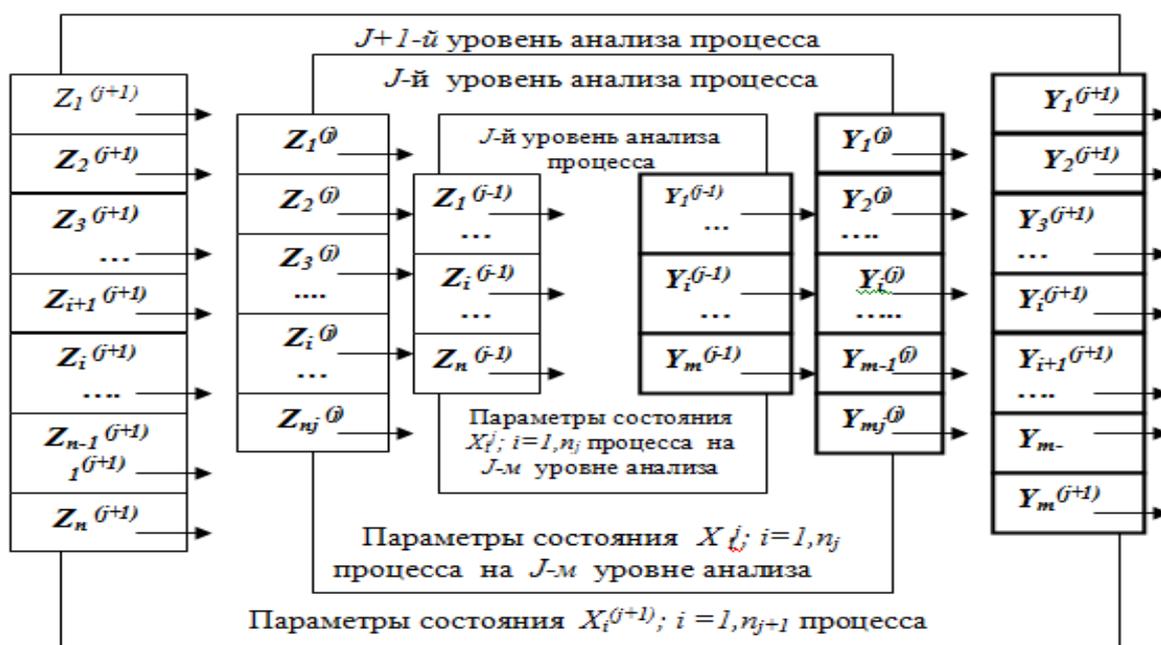


Рисунок 17 – Структурная схема многоуровневого параметрического описания процесса на трех смежных $j+1-M$, $j-M$ и $j-1-M$ уровнях
 $Z^{(j+1)}$, $Y^{(j+1)}$, $\chi^{(j+1)}$ - i -й параметр входа, выхода и состояния $j+1$ -го уровня

Источник: Составлено автором по данным [136, 58, 10]

Таким образом, многоуровневая иерархическая структура радиационно-конвективной сушки казеина определяет задачи моделирования и оптимизацию процесса, определяет стратегию получения качественного казеина на выходе и эффективность сушки при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве.

2.4 Структурно-параметрическое моделирование радиационно-конвективной сушки казеина

Структурно-параметрическое описание процесса является первоочередной задачей общего системного анализа и исследования радиационно-конвективной сушки казеина. Заключается в формализации связей между параметрами и факторами, определяющими их функционирование как системы процесса сушки в матричной форме с выделением показателей качества влажного, сухого казеина, технологических режимов процесса сушки.

2.4.1 Разработка структурно-параметрической модели радиационно-конвективной сушки казеина

Построение структурно-параметрической модели процесса (система) сушки казеина в виде взаимосвязанных параметров показателей качества влажного и сухого продукта, технологических режимов и сушильного аппарата сводится к следующим этапам:

1) описание процесса сушки казеина: группы свойств (показатели влажного казеина, характеристики ИК - энергоподвода и теплоносителя, параметры режима сушки, физико-химические свойства сухого казеина);

2) разработка крупноблочной модели матрицы процесса сушки казеина (влажный казеина, технические параметры и режимы сушки, сушильный аппарат и сухой казеина), каждый диагональный блок матрицы описывает параметры состояния функциональных подсистем и их общие цели и может быть разделен на более мелкие составные элементы или подсистемы с детализацией конкретных факторов и их влияния на элементы и подсистемы;

3) составление параметрических моделей структурных элементов процесса сушки в виде набора векторов входных и выходных факторов и параметров состояния;

4) описание характеристики связей и взаимодействия между элементами и блоками процесса сушки, определяемые методами факторного анализа, планирования эксперимента и экспертных оценок.

Множество показателей и свойств влажного и сухого казеина, характеристики и технологические регламенты радиационно-конвективной сушки казеина представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели и свойства влажного и сухого казеина, характеристики и технологические регламенты радиационно-конвективной сушки

Группы свойств	Переменная состояния
Показатели поступающего влажного казеина	1 Массовая доля сухих веществ
	2 Реологические свойства

Группы свойств	Переменная состояния
	3 Запах
	4 Вкус
	5 Цвет
	6 Кислотность, РН
	7 Начальная температура
Характеристики сушильного аппарата	8 Мощность сушильной установки
	9 Источники ИК- излучения
	10 Нагреватели влажного воздуха
Параметры режима сушки	11 Скорость и температура влажного воздуха
	12 Температура влажного воздуха в камере
	13 Теплофизические характеристики казеина
	14 Изменение температуры в сушильной камере
	15 Температура в центре и на поверхности казеина
	16 Продолжительность сушки
Физико-химические показатели сухого казеина	17 Температура сухого казеина при выходе из камеры
	18 Массовая доля сухих веществ
	19 Реологические свойства
Органолептические показатели сухого казеина	20 Вкус
	21 Запах
	22 Цвет

Источник: Составлено автором

Для описания радиационно-конвективной сушки казеина и выявления связей между факторами использовались данные проведенных многократных экспериментов (табл 2), а при отсутствии каких-либо недостающих данных о связи между факторами, связи были установлены с помощью опроса экспертов (в табл. 2 символ* означает наличие связи между факторами).

Связи между факторами могут быть установлены с помощью коэффициентов регрессии и корреляции (в табл 2 символ (+) означает вскрытые данные в результате анализа, (-) означает неподтвержденные данные).

Пустые клетки предполагают возможность априорно неизвестных или нулевых характеристик влияния. Для сопоставимой оценки отклонений и связей параметров различной физической природы коэффициенты регрессии пересчитываются в безразмерные.

Таблица 2 – Фрагмент экспертных и статистических характеристик связей в структурно-параметрической модели сушки казеина

Параметры состояния	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
Параметры влажного казеина															
1. Начальная температура $X_1, ^\circ\text{C}$	1														
2. Предельное напряжение сдвига казеин θ_0'' а, Па, X_2	*	1													
3. Содержание влаги, % X_3 ,	*		1												
4. Кислотность казеина, $^\circ\text{T}$, X_4				1											
5. Органолептические показатели, балл, X_5			(-)		1										
Параметры режима радиационно-конвективной сушки															
6. Плотность лучистого потока, кВт/м ² , X_6	*					1									
7. Температура теплоносителя $^\circ\text{C}$, X_7	*		(-)				1								
8. Время процесса сушки τ , мин, X_8	*		(+)	(-)		*	(-)	1							
9. Энергозатраты, кВт·ч/кг, X_9			(+)	(-)	*	*	(-)	(+)	1						
10. Толщина образца, см, X_{10}	*				(+)			(-)	(-)	1					
11. Расстояние от продукта до излучателей h , см, X_{11}	(+)			(+)							1				
Показатели сухого казеина															
12. Органолептические показатели, балл, X_{12}	(+)	*	*	(+)	*	*	*	*	*	*	(+)	1			
13. Содержание белка, %, X_{13}	(+)	(-)	*		(+)		*	*		*		*	1		
14. Эффективная вязкость раствора казеина (20 %), Па·с X_{14}	*	*	*	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)		*	*		1	
15. Содержание влаги, % X_{15}	(+)	(-)	*	*	(+)	*	*	*	*	*	*	*	(+)		1
Примечания															
* означает наличие связи между факторами															
(+) означает вскрытые данные в результате анализа															
(-) означает неподтвержденные данные															

Источник: составлено автором на основании проведенных лабораторных исследований

Определение параметров состояния сушки, описание экспериментальной установки и методика проведения эксперимента

Технология производства казеина

На рисунке 18 показана технологическая схема производства казеина

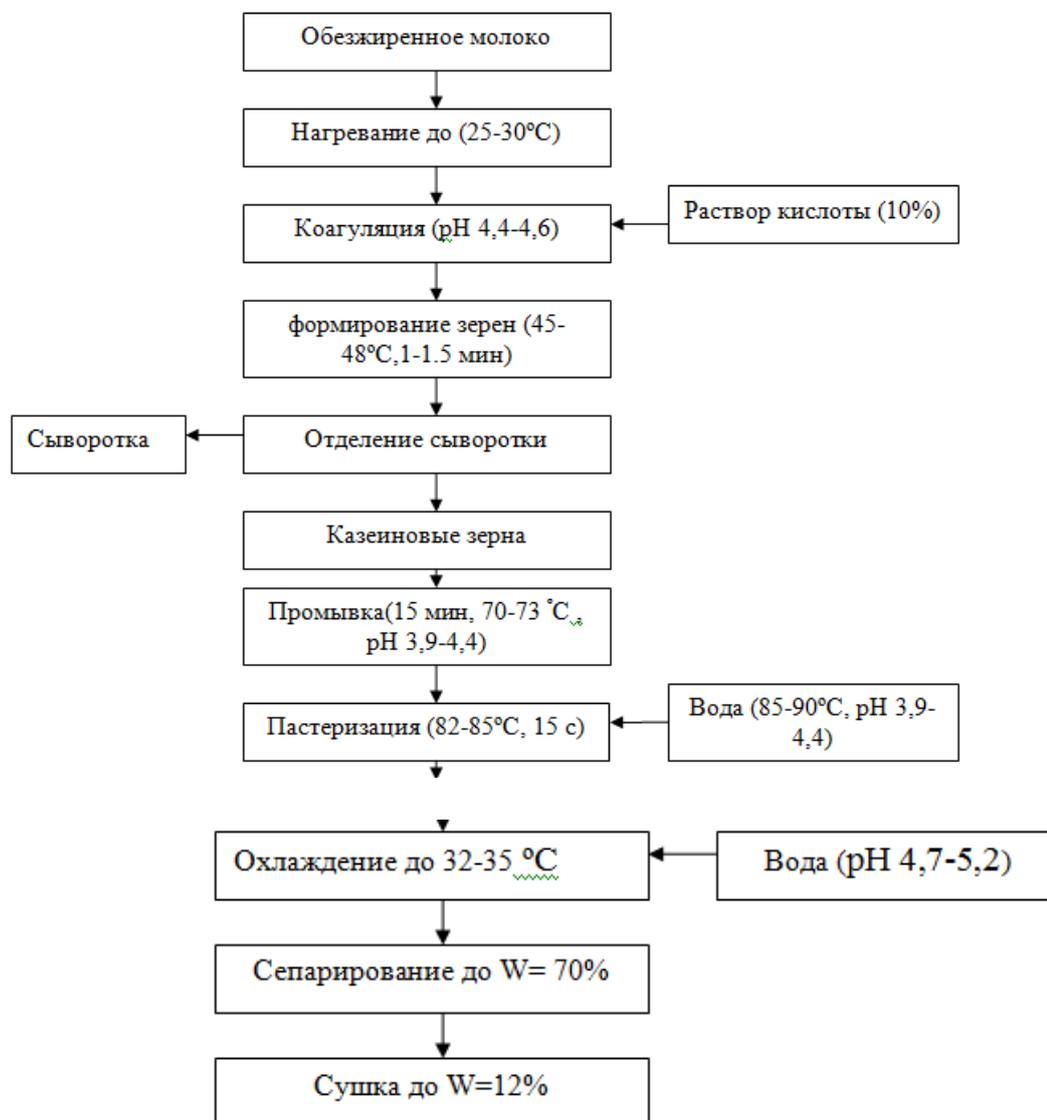


Рисунок 18 – Технологическая схема производства кислотного казеина

Источник: Составлено автором

Описание экспериментальной установки

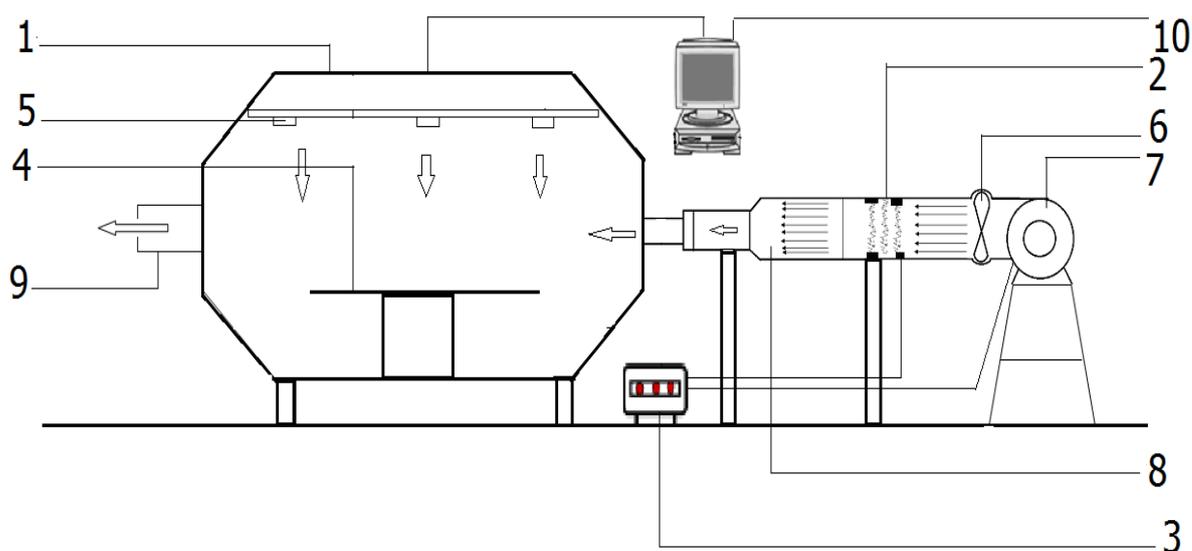
Экспериментальные исследования процесса сушки казеина проводились в лабораторной установке с рабочим объемом 24 л (рисунок 19).

Устройство состоит из нагревательной камеры (1), электронагревателя (2), регулятора мощности (3), сушильного лотка (4), источника ИК: лампы с нихромо-

вой спиралью со степенью черноты окисленного нихрома ($\varepsilon_1 \approx 0,85$), стекла ($\varepsilon_2 \approx 0,82$) (5), вентилятора (6), воздуходувки (7), персонального компьютера (10).

Система предназначена для условий комбинированной инфракрасной сушки с интенсивностью инфракрасного излучения 2000 Вт/м^2 и горячей конвекции, подача горячего воздуха скоростью $0,6 \text{ м/с}$ при разных температурах $100 \text{ }^\circ\text{C}$, $140 \text{ }^\circ\text{C}$, $160 \text{ }^\circ\text{C}$ и $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Сушку осуществляют до достижения влажности в казеине 12% . При запуске программы на экране монитора появляется лицевая панель программы эксперимента (рисунок 20). В нижней части экрана помещен осциллограф для регистрации остаточной массы высушиваемого материала и количества испаренной влаги.

В правой и верхней части лицевой панели расположены индикаторы, отображающие текущие значения температуры воздуха в рабочем объеме установки, массы высушиваемого материала и испаренной влаги.



- 1 – нагревательная камера, 2 – электронагреватель, 3 – регулятор мощности,
4 – сушильный лоток, 5 – ИК-источник, 6 – вентилятор, 7 – воздуходувка, 8 – вход воздуха,
9 – выход воздуха, 10 – персональный компьютер

Рисунок 19 – Экспериментальный стенд сушильного устройства

Источник: Составлено автором

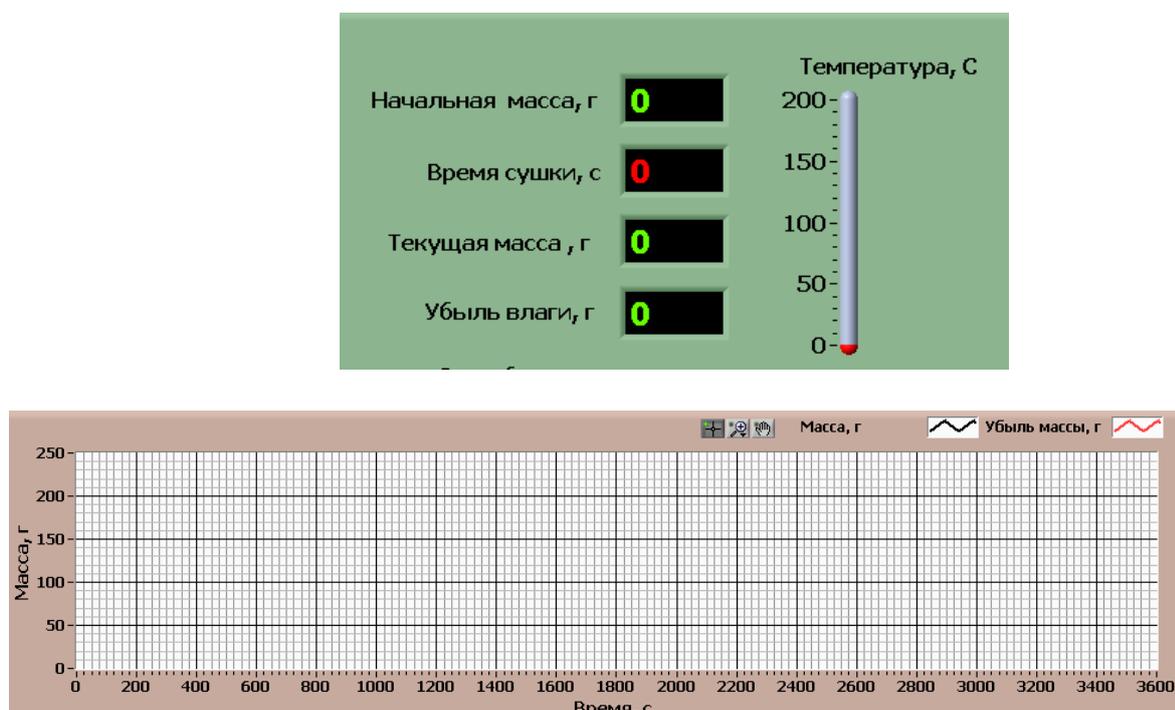


Рисунок 20 – Лицевая панель компьютерной системы для ввода экспериментальных исходных данных

Источник: Составлено автором

Описание методики проведения сушки казеина

Свежий приготовленный казеин с исходной влажностью 80 % пропускают через пресс гранулятор, в котором продукты выпрессовываются до влажности 70 %. Казеин на сушку поступает слоем толщиной, в диапазоне равной (0,4-1,2 см). Процесс сушки начинают за счет подачи тепла нагревательными элементами, время при этом составляет 10 минут, далее проводим естественную досушку за счет аккумулированного тепла внутри рабочей камеры при отключенных инфракрасных нагревательных элементов и конвекционной системы, продолжительность этого процесса составит 5 мин. Процесс осуществляют до достижения влажности 12 %. Сушка казеина проводилась при режимах:

- температура источника излучения $t_{\text{изл}}=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{изл}}=190\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{изл}}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- воздух со скоростью 0,6 м/с поступает в сушильную камеру через один вход при разных температурах 100 °С, 140 °С, 160 °С и 180 °С.
- плотность теплового потока - ИК (2,88- 2,91- 3,02 - 3,07) кВт/м².
- расстояние от объекта сушки казеина до излучателей варьирует в диапазоне (10 -12 -15 - 20) см.

Определение параметров влажного казеина

Измерение температуры казеина

Температуру влажного казеина измеряют с помощью контактного термометра (*Testo 108*).

Определение предельного напряжения сдвига

Предельное напряжение сдвига влажного казеина (θ_0'') определяется по формуле:

$$\theta_0'' = K \times \frac{m}{(h \times 10^4)^2} \quad (64)$$

где θ_0'' – предельное напряжение сдвига, Па;

K – константа конуса, $K = 4,1$;

h – глубина погружения конуса, в единицах прибора;

m – масса конуса, $m = 0,1$ кг .

Для проведения пенетрации используется полуавтоматический пенетрометр (*пенетрометра ПП-5*), который позволяет замерять одновременно предельное напряжение сдвига и степень пенетрации [49, 57].

Измерение содержания влаги

Для определения содержания влаги в казеине применяются метод высушивания навески при (102 ± 2) °С, приведенный в ГОСТ 3626-73 «Молоко и молочные продукты. Методы определения содержания влаги и сухого вещества» [26].

Для этого стеклянную охлажденную бюксу с песком, предварительно выдержанную при (102 ± 2) °С в течение 30-40 мин в сушильном шкафу, затем вносят 3-5 г казеина, содержимое перемешивают стеклянной палочкой, нагревают на водяной бане, помещают на 2 часа в сушильный шкаф с температурой (102 ± 2) °С.

Затем бюксу охлаждают в эксикаторе в течении 40 мин и взвешивают с погрешностью не более 0,001 г. Массовую долю сухого вещества (C , в процент) вычисляют по формуле:

$$C = \frac{(m_1 - m_2) \times 100}{m_1 - m}, \quad (65)$$

где m – масса бюксы, г;

m_1 – масса бюксы с исходной навеской, г;

m_2 – масса высушенной навески, г.

Массовую долю влаги в продукте (W , в процент) вычисляют по формуле:

$$W = 100 - C, \quad (66)$$

где C – массовая доля сухого вещества, процент.

Определение активной кислотности (pH)

Определение кислотности продукта осуществляют методом нейтрализации кислот раствором гидроксида натрия в качестве индикатора используют раствор фенолфталеина [35].

Органолептическая оценка продукта

Для проведения органолептического анализа применяют метод, приведенный в ГОСТ Р ИСО 22935-2-2011 «Молоко и молочные продукты. Органолептический анализ. Часть 2. Рекомендуемые методы органолептической оценки» [27].

Параметры режима радиационно-конвективной сушки казеина

Определение расхода теплоты на сушку казеина

Расчет расхода теплоты при ИК- нагреве можно провести с помощью уравнения (69). Расчет расхода теплоты на нагрев казеина при конвективной сушке по формуле:

$$q_{\text{п}} = \frac{G_2 \times c_{\text{п}}}{W} (t_{\text{н}} - t_{\text{с.п}}), \quad (67)$$

где W – производительность сушильной установки по испаренной влаге, кг/ч;

G_2 – производительность сушилки по высушенному материалу, кг/ч;

$c_{\text{п}}$ – удельная теплоемкость казеина, кДж/(кг·К);

$t_{\text{н}}$ – начальная температура казеина, поступающего в сушилку, °С;

$t_{\text{с.п}}$ – конечная температура казеина, выходящего из сушилки, °С.

Показатели сухого казеина

Определение массовой доли белка

Для определения содержания белка в казеине используют метод *Кьельдаля*, согласно ГОСТ 34454-2018 «Продукция молочная. Определение массовой доли белка методом *Кьельдаля*» [25].

Определение эффективной вязкости раствора казеина (20 %) на ротационном вискозиметре (*Реотест-2*).

Измерение структурно-механических свойств сухого казеина значительно дополняет характеристику консистенции, повышает объективность оценки его сушки. Поэтому, с целью объективной оценки процесса сушки казеина исследовали структурно-механические характеристики его раствора (20 %) на ротационном вискозиметре «*Реотест*». Раствор казеина (20 %) относится к жидкообразным телам, так как он не обладает упругими свойствами. Поэтому для объективной сравнительной количественной оценки структуры исследуемых образцов исследовали наиболее чувствительные к изменению консистенции следующие характеристики: напряжение сдвига, эффективную вязкость при единичной скорости сдвига ($\dot{\varepsilon} = 1$) по двухпараметрической модели *Оствальда* [49,57].

$$\theta = \eta_s \times \dot{\varepsilon}^n, \quad (68)$$

где θ – напряжение сдвига (Па);

$\dot{\varepsilon}^n$ – скорость сдвига (с^{-1});

η_s – эффективная вязкость (Па.с);

n – индекс течения.

Полученные данные математически обрабатывали с помощью ПК в программе *Table Curve 2D v5.01*. В таблице 3 указаны нижние и верхние пределы варьирования параметров процесса сушки казеина, полученные экспериментальным и расчетным путем.

Таблица 3 – Показатели и свойства влажного и сухого казеина и интервал варьирования параметров

Показатели и свойства влажного и сухого казеина и интервал варьирования параметров		
<i>Параметры влажного казеина</i>		
X ₁	Начальная температура, °С.	20–25
X ₂	Предельное напряжение сдвига казеина θ_0^n , Па	9,7–10,5

Показатели и свойства влажного и сухого казеина и интервал варьирования параметров		
X_3	Исходное содержание влаги, процент.	68–72
X_4	Органолептические показатели, балл.	4,5–5,0
X_5	Кислотность казеина, °Т.	220–227
<i>Параметры режима радиационно-конвективной сушки</i>		
X_6	Плотность лучистого потока, кВт/м ² .	2,02–3,97
X_7	Температура теплоносителя, градус.	100–180
X_8	Продолжительность сушки τ , мин.	155–168
X_9	Энергозатраты, кВт·ч/кг.	2,19–2,42
X_{10}	Толщина образца, см	0,4–1,2
X_{11}	Расстояние от объекта сушки до излучателей h , см	10–20
<i>Показатели сухого казеина</i>		
X_{12}	Органолептические показатели, балл	4,5–5,0
X_{13}	Содержание белка, процент.	84–86
X_{14}	Эффективная вязкость раствора казеина (20 %), Па·с	5,25–47,90
X_{15}	Содержание влаги, процент.	11–12

Источник: составлено автором на основании проведенных лабораторных исследований

2.4.2 Корреляционный и регрессионный анализ процесса

Исходный массив экспериментальных данных о состоянии радиационно-конвективной сушки казеина представлен в таблице 4 в виде матрицы $X_{(m, n)} = (x_{kj})$, ($k=1, m; j=1, n$), где x_{kj} - значение j -го фактора в k -м опыте.

На основе экспериментальных данных определили коэффициенты корреляции и показали их в виде матрицы в таблице 4:

$$r_{ij} = \frac{1}{m-1} \times \sum_{k=1}^m \frac{(x_{ki} - \bar{x}_i)}{S_{x_i}} \times \frac{(x_{kj} - \bar{x}_j)}{S_{x_j}}, \quad (69)$$

где \bar{x}_i, \bar{x}_j – среднее значение i -го и j -го факторов в k -м опыте;

S_{x_i}, S_{x_j} – среднеквадратичные отклонения соответствующих факторов.

Для описания связей между коррелируемыми факторами определили коэффициенты линейной множественной регрессии [11]:

$$\Delta x_i = \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} \times \Delta x_j, j = \overline{1, n} \quad (70)$$

И составили их в виде регрессионной матрицы P_{ij} ; $i, j = \overline{1, n}$ в таблице 6.

Для определения сопоставимых оценок отклонений и связей параметров режима сушки коэффициенты (таблица 6) пересчитали в матрицу безразмерных сопоставимых характеристик (таблица 7) [12, 13, 14]:

$$C_{ij} = \frac{p_{ij} \times \Delta x_j^0}{\Delta x_i^0}, i, j = \overline{1, n}, \quad (71)$$

где Δx_i^0 и Δx_j^0 – допустимые отклонения от нормы.

2.4.3 Ситуационная структурно-параметрическая модель процесса сушки казеина

По данным в матрице взаимосвязей и $\Delta x_1, \dots, \Delta x_n$ путем умножения матрицы $\|C_{ij}\|^n$ на $\Delta x_j \times \delta_{jk}$ диагональную матрицу отклонений получаем *ситуационную матрицу*:

$$\begin{pmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & 1 & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta x_1 & & & \\ & \Delta x_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \Delta x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_1 & c_{12}\Delta x_2 & \dots & c_{1n}\Delta x_n \\ c_{21}\Delta x_1 & \Delta x_2 & \dots & c_{2n}\Delta x_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1}\Delta x_1 & c_{n2}\Delta x_2 & \dots & \Delta x_n \end{pmatrix} \quad (72)$$

Ситуационная модель процесса сушки казеина представлена в таблице 6.

Таблица 4 – Исходный массив экспериментальных данных

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
21,8	11,3	71,4	220	4,5	2,02	100	219	4,97	0,4	10	3,5	84,4	1,81	11,4
23,9	10,7	71,3	219	4,5	3,42	160	125	2,67	0,8	10	3,4	85,5	1,26	11,5
22,6	10,7	69,9	223	4,8	2,88	180	117	2,57	1,0	10	3,7	84,2	1,53	11,2
23,9	9,9	71,3	224	4,7	3,97	140	147	3,33	1,2	10	3,9	86,4	1,90	12,4
24,1	10,8	71,7	219	4,5	3,42	100	215	4,83	0,4	12	4,1	85,6	1,56	11,6
21,3	10,9	71,1	221	4,5	3,97	180	115	2,50	0,8	12	4,0	84,8	1,66	11,8
24,6	11,4	70,5	218	4,6	2,88	140	150	3,33	1,0	12	3,8	84,8	1,25	11,8
24,4	11,3	70,7	224	4,7	2,02	160	129	2,80	1,2	12	4,1	84,6	1,41	11,6
23,9	10,6	69,9	225	4,5	3,42	160	123	2,67	0,4	15	4,5	85,1	1,67	11,1
22,2	11,7	70,6	226	4,6	2,02	140	146	3,33	1,2	15	4,4	85,2	1,56	12,2
23,1	11,9	71,3	221	4,5	2,88	100	217	4,90	1,0	15	4,1	85,1	1,73	12,1
24,8	12,0	70,9	226	4,5	3,97	180	120	2,67	0,8	15	4,2	84,4	1,83	11,4
24,9	10,6	71,8	228	4,6	3,97	180	119	2,63	1,0	20	4,3	85,5	1,76	11,5
23,3	10,2	69,5	223	4,8	2,88	160	131	2,87	1,2	20	4,3	85,6	1,25	11,6
22,0	10,5	70,8	224	4,4	2,02	140	152	3,40	0,4	20	4,4	85,3	1,95	12,3

Источник: составлено автором на основании проведенных лабораторных исследований

Таблица 5 – Матрица коэффициентов корреляции r_{ij}

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
X_1	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_2	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_3	0,00	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_4	0,00	0,00	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_5	0,00	0,00	-0,5	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_7	0,00	0,00	-0,4	0,54	0,00	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
X_8	0,00	0,00	0,47	-0,53	0,00	0,00	-0,97	1,00	–	–	–	–	–	–	–
X_9	0,00	0,00	0,47	-0,51	0,00	0,00	-0,97	1,00	1,00	–	–	–	–	–	–
X_{10}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	0,00	0,00	-0,35	-0,34	1,00	–	–	–	–	–
X_{11}	0,40	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	–	–	–	–
X_{12}	0,37	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	1,00	–	–	–
X_{13}	0,72	-0,37	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	–	–
X_{14}	0,00	0,00	0,00	0,5	0,00	0,36	0,92	-0,83	-0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	–

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
X_{15}	0,72	-0,37	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	0,00	1,00

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Таблица 6 – Матрица коэффициентов регрессии

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
X_1	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_2	0,03	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_3	0,00	-7,05	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_4	0,00	-0,05	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_5	0,00	-0,30	-0,06	0,53	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_6	0,00	-5,12	0,00	-0,12	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_7	-7,52	0,00	-0,73	0,67	4,38	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
X_8	6,25	0,00	0,35	-0,48	0,00	0,00	0,31	1,00	–	–	–	–	–	–	–
X_9	-0,05	0,00	-0,01	0,01	0,00	-0,91	-0,01	0,02	1,00	–	–	–	–	–	–
X_{10}	0,00	0,00	0,00	0,00	1,75	0,00	0,00	-0,04	1,46	1,00	–	–	–	–	–

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
X_{11}	1,92	0,00	0,46	-0,05	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,15	0,00	1,00	–	–	–	–
X_{12}	0,19	0,00	0,00	0,04	1,96	-0,03	0,00	0,00	-0,12	0,00	0,05	1,00	–	–	–
X_{13}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,23	-0,01	0,20	1,00	–	–
X_{14}	0,00	0,00	0,00	-0,36	-0,03	-0,39	0,54	-0,53	32,90	0,01	0,00	-12,30	0,00	1,00	
X_{15}	0,00	0,00	0,00	-0,01	1,74	0,00	0,00	0,00	0,02	-0,04	0,00	0,27	1,00	22,20	1,00

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Таблица 7 – Матрица сопоставимых оценок взаимосвязей

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
X_1	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_2	0,08	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_3	0,00	-7,81	1,00		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_4	0,00	-0,23	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_5	0,00	-0,06	-0,01	0,02	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_6	0,00	-6,34	0,00	-0,03	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
X_7	-913,0	0,00	-33,60	7,00	1,15E03	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
X_8	988,00	0,00	20,70	-6,44	0,00	0,00	0,40	1,00	–	–	–	–	–	–	–
X_9	-0,19	0,00	-0,01	0,00	0,00	-1,15	0,00	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–
X_{10}	0,00	0,00	0,00	0,00	4,57	0,00	0,00	0,00	0,48	1,00	–	–	–	–	–
X_{11}	29,60	0,00	2,70	-0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	0,00	1,00	–	–	–	–
X_{12}	0,24	0,00	0,00	0,00	5,49	-0,01	0,00	0,00	-0,04	0,00	0,00	1,00	–	–	–
X_{13}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,23	0,00	0,18	1,00	–	–
X_{14}	0,00	0,00	0,00	-0,84	-1,83	-3,53	0,12	-0,09	239,00	0,20	0,00	-258,00	0,00	1,00	–
X_{15}	0,00	0,00	0,00	0,00	4,52	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,04	0,00	0,25	1,00	0,99	1,00

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Таблица 8 – Матрица аномальной ситуации

Параметры состояния	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
(X^0) Желаемое значение	15,90	10,9	70,90	222,60	4,60	3,10	145,0	152,4	3,40	0,90	14,30	4,10	15,30	55,00	15,30
(X) Фактическое значение	15,80	11,3	71,40	220,00	4,50	2,02	100,0	219,0	4,97	0,40	10,00	3,50	15,40	48,81	15,40
$(/ X - X^0)$ Абсолютное отклонение	00,13	0,36	0,53	2,56	0,08	1,05	45,0	66,6	1,58	0,45	4,25	0,56	0,10	6,17	0,10

Параметры состояния	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
Относительное откл., в долях от $\Delta x_i^0 = 0,1^*$ X^0	0,16	0,65	0,15	0,23	0,35	6,85	6,21	8,74	9,29	10,60	5,96	2,77	0,13	2,24	0,13

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Таблица 9 – Ситуационная модель процесса сушки казеина

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
X_1	0,16	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_2	0,00	0,65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_3	0,00	-5,08	0,15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_4	0,00	-0,15	0,00	0,23	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_5	0,00	-0,04	0,00	0,00	0,35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_6	0,00	-4,12	0,00	-0,01	0,00	6,85	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X_7	- 146,0 0	0,00	-5,05	1,61	401,15	0,00	6,21	–	–	–	–	–	–	–	–
X_8	158,0 9	0,00	3,11	-1,48	0,00	0,00	2,51	8,74	–	–	–	–	–	–	–
X_9	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	-7,85	0,00	0,00	9,29	–	–	–	–	–	–
X_{10}	0,00	0,00	0,00	0,00	1,6	0,00	0,00	-0,01	4,42	10,60	–	–	–	–	–

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
X_{11}	4,74	0,00	0,40	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	5,79	0,00	5,96	–	–	–	–
X_{12}	0,04	0,00	0,00	0,00	1,92	-0,09	0,00	0,00	-0,40	0,00	0,02	2,77	–	–	–
X_{13}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,13	-2,47	-0,01	0,51	0,13	–	–
X_{14}	0,00	0,00	0,00	-0,19	-0,64	-24,21	0,74	-0,79	22,1	2,11	0,00	-13,9	0,00	2,24	–
X_{15}	0,00	0,00	0,00	0,00	1,58	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,43	0,00	0,70	00,13	2,22	0,13

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

С помощью ситуационной матрицы решили задачу диагностирования нормальной ситуации радиационно-конвективной сушки казеина.

Ситуационная модель процесса сушки казеина (таблица 9) показывает:

– изменение содержания влаги сухого казеина $\Delta X_{15} = 0,13$ вызвано отклонением следующих параметров: (эффективной вязкости раствора казеина 20 % $\Delta X_{14} = 2,24$ с коэффициентом влияния 2,22), (содержания белка $\Delta X_{13} = 0,13$ с коэффициентом влияния 0,13), (органолептических показателей $\Delta X_{12} = 2,77$ с коэффициентом влияния 0,70), ($\Delta X_{10} = 10,60$ толщиной образца коэффициентом влияния минус 0,43) и (кислотности казеина $\Delta X_5 = 0,35$ с коэффициентом влияния 1,58);

– изменение эффективной вязкости раствора казеина 20 % $\Delta X_{14} = 2,24$ вызвано отклонением следующих параметров: (органолептических показателей $\Delta X_{12} = 2,7$ с коэффициентом влияния минус 13,9), $\Delta X_{10} = 10,60$ толщиной образца коэффициентом влияния 2,11), (энергозатраты $\Delta X_9 = 9,29$ с коэффициентом влияния 22,11), (продолжительности сушки $\Delta X_8 = 8,74$ с коэффициентом влияния минус 0,79), (температуры теплоносителя $\Delta X_7 = 6,21$ с коэффициентом влияния минус 0,74), (плотности лучистого потока $\Delta X_6 = 6,85$ с коэффициентом влияния минус 24,21), кислотности казеина $\Delta X_5 = 0,35$ с коэффициентом влияния минус 0,64), (органолептических показатели $\Delta X_4 = 0,23$ с коэффициентом влияния минус 0,19);

– изменение содержание белка $\Delta X_{13} = 0,13$ вызвано отклонением следующих параметров: (органолептических показателей $\Delta X_{12} = 2,77$ с коэффициентом влияния 0,51), (расстояния от продукта до излучателей $\Delta X_{11} = 5,96$ с коэффициентом влияния минус 0,01), ($\Delta X_{10} = 10,60$ толщиной образца коэффициентом влияния минус 2,74), (энергозатраты $\Delta X_9 = 9,29$ с коэффициентом влияния 22,11);

– изменения органолептических показателей $\Delta X_{12} = 2,77$ вызваны отклонением следующих параметров: (расстояния от продукта до излучателей $\Delta X_{11} = 5,96$ с коэффициентом влияния 0,02), (энергозатраты $\Delta X_9 = 9,29$ с коэффициентом влияния минус 0,40), (плотности лучистого потока $\Delta X_6 = 6,85$ с коэффициентом влия-

ния минус 0,09), (кислотности казеина $\Delta X_5 = 0,35$ с коэффициентом влияния 1,92), (начальной температуры $\Delta X_1 = 0,16$ коэффициентом влияния 0,04);

– изменение расстояния от продукта до излучателей $\Delta X_{11} = 5,96$ влияет на изменения следующих параметров: (энергозатраты $\Delta X_9 = 9,29$ с коэффициентом влияния 5,79), (органолептические показатели $\Delta X_4 = 0,23$ с коэффициентом влияния минус 0,02), (начальной температуры $\Delta X_1 = 0,16$ коэффициентом влияния 4,74);

– изменение толщины образца $\Delta X_{10} = 10,60$ влияет на отклонение следующих параметров: (энергозатраты $\Delta X_9 = 9,29$ с коэффициентом влияния 4,42), (продолжительности сушки $\Delta X_8 = 8,74$ с коэффициентом влияния минус 0,01), (кислотности казеина $\Delta X_5 = 0,35$ с коэффициентом влияния 1,6);

– изменение энергозатрат $\Delta X_9 = 9,29$ вызваны отклонением следующих параметров: (плотности лучистого потока $\Delta X_6 = 6,85$ с коэффициентом влияния минус 7,85), (начальной температуры $\Delta X_1 = 0,16$ коэффициентом влияния 0,03);

– изменение продолжительности сушки $\Delta X_8 = 8,74$ вызвано отклонением следующих параметров: (температуры теплоносителя $\Delta X_7 = 6,21$ с коэффициентом влияния 2,51), (органолептических показатели $\Delta X_4 = 0,23$ с коэффициентом влияния минус 1,48), (исходного содержания влаги $\Delta X_3 = 3,11$ с коэффициентом влияния 3,11), (начальной температуры $\Delta X_1 = 0,16$ коэффициентом влияния 158,9);

– изменение температуры теплоносителя $\Delta X_7 = 6,21$ вызвано отклонением следующих параметров: (кислотности казеина $\Delta X_5 = 0,35$ с коэффициентом влияния 401,15), (органолептических показатели $\Delta X_4 = 0,23$ с коэффициентом влияния 1,61), (исходного содержания влаги $\Delta X_3 = 3,11$ с коэффициентом влияния минус 5,05), (начальной температуры $\Delta X_1 = 0,16$ коэффициентом влияния минус 146);

– изменение плотности лучистого потока $\Delta X_6 = 6,85$ влияет на следующие параметры: органолептические показатели $\Delta X_4 = 0,23$ с коэффициентом влияния

минус 0,01), (предельное напряжения сдвига казеина $\Delta X_2 = 0,65$ с коэффициентом влияния минус 4,12);

– изменение кислотности казеина $\Delta X_5 = 0,35$ вызвано отклонением предельного напряжения сдвига казеина $\Delta X_2 = 0,65$ с коэффициентом влияния минус 0,04;

– изменение органолептических показателей $\Delta X_4 = 0,23$ вызваны отклонением предельного напряжения сдвига казеина $\Delta X_2 = 0,65$ с коэффициентом влияния минус 0,15;

– исходное содержание влаги $\Delta X_3 = 3,11$ вызвано отклонением предельного напряжения сдвига казеина $\Delta X_2 = 0,65$ с коэффициентом влияния минус 5,08.

Блок-схема общего алгоритма идентификации и прогнозирования состояния радиационно-конвективной сушки казеина показана на рисунке 21.

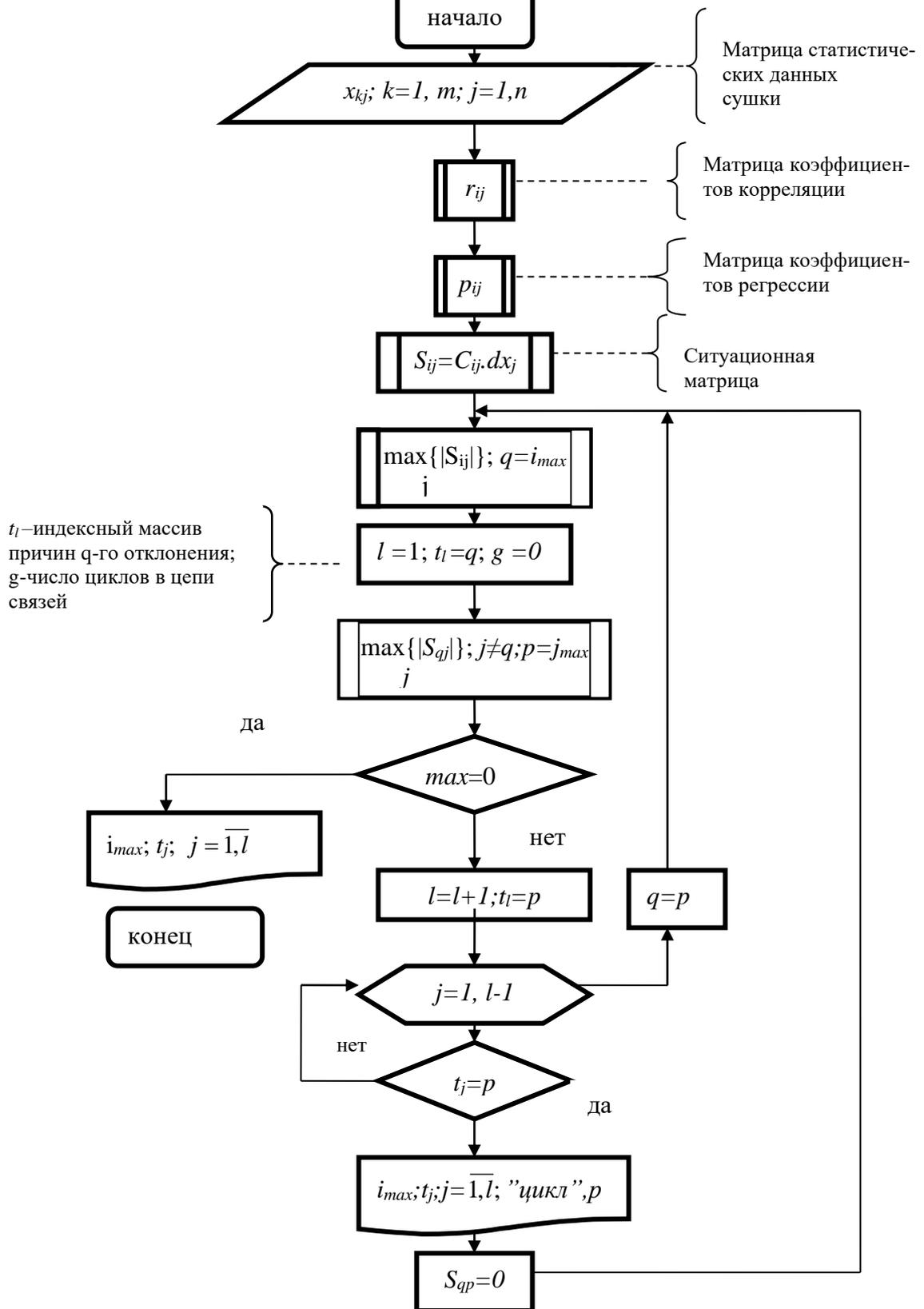


Рисунок 21 – Блок-схема алгоритма идентификации состояния процесса сушки казеина

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Таким образом, ситуационная модель (таблица 9) позволяет:

- решить задачу диагностирования аномальной ситуации радиационно-конвективной сушки казеина;
- компьютеризировать диагностику и прогнозирование состояния процесса сушки;
- обеспечить компьютерный контроль и управление радиационно-конвективной сушки с принятием оптимальных решений;
- определить оптимальные параметры режима сушки;
- найти оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильного аппарата.

2.5 Моделирование и оптимизация радиационно-конвективного процесса сушки казеина

В процессе сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве происходят значительные изменения свойств, а именно: органолептические и физико-химические, структурно-механические, теплофизические (удельная теплоемкость-теплопроводность- температуропроводность и т.д.). Поэтому для организации и оптимизации процесса сушки казеина необходимо учитывать специфические свойства казеина и их изменения как объектов сушки и рассматривать их закономерность в зависимости от параметров режима сушки.

При обосновании и выборе оптимальных параметров режима сушки необходимо исходить из технологических, теплофизических свойств казеина и технических характеристик сушильной камеры. При выборе и разработке конструкции сушильной камеры оптимальные параметры режима сушки при инфракрасном конвективном нагреве должны обеспечивать наилучшее качество сухого казеина при высоких технико-экономических показателях и минимальном расходе тепла и электроэнергии. Для обоснования оптимальных параметров режима сушки казеина, был проведен многофакторный план эксперимента. Такой метод дает возможность определить минимальное число опытов на основе выбранного критерия оп-

тимальности, определить рациональные параметры режима сушки и математические зависимости между ними.

В качестве исследуемого объекта был выбран влажный казеин (70 %), масса которого составила (20 г).

Для сушки казеина были приняты функции:

y_1 – органолептические показатели сухого казеина, A , балл;

y_2 – энергозатраты на процесс сушки казеина Q , кВт×ч/кг;

y_3 – продолжительность процесса сушки казеина τ , мин;

y_4 – предельное напряжение сдвига раствора казеина (20 %) (θ_0^h), Па.

Факторы, влияющие на процесс сушки казеина были приняты:

x_1 – расстояние от объекта сушки казеина до излучателей h , см;

x_2 – толщина образца, см;

x_3 – плотность ИК– теплового потока $q_{из}$, кВт/м²;

x_4 – температура горячего воздуха, .

Для планирования эксперимента, использовали греко-латинский квадрат (4x4) (табл. 10). Были реализованы шестнадцать опытов сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве с варьированием факторов на четырех уровнях.

Таблица 10 – Факторы, влияющие на процесс сушки казеина и уровни их варьирования

Факторы	Уровень			
	1	2	3	4
1. Расстояние от объекта сушки казеина до излучателей h , см	10	12	15	20
2. Толщина образца, см	0,4	0,8	1,0	1,2
3. Плотность ИК-теплового потока $q_{из}$, кВт/м ²	2,02	2,88	3,42	3,97
4. Температура горячего воздуха, °С.	100	140	160	180

Источник: составлено автором на основании проведенных лабораторных исследований

Таблица 11 – Экспериментальные данные процесса сушки казеина в виде греко-латинского квадрата (4×4)

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4
1	10	0,4	2,02	100	4,4	4,97	219	48,81
2	10	0,8	3,42	160	4,4	2,67	125	56,16
3	10	1,0	2,88	180	3,9	2,57	117	66,13
4	10	1,2	3,97	140	4,3	3,33	147	51,90
5	12	0,4	3,42	100	4,3	4,83	215	45,56
6	12	0,8	3,97	180	3,8	2,50	115	64,06
7	12	1,0	2,88	140	4,4	3,33	150	53,25
8	12	1,2	2,02	160	4,2	2,80	129	55,41
9	15	0,4	3,42	160	4,1	2,67	123	54,67
10	15	1,2	2,02	140	4,3	3,33	146	52,56
11	15	1,0	2,88	100	4,5	4,90	217	47,13
12	15	0,8	3,97	180	3,7	2,67	120	66,13
13	20	1,0	3,97	180	3,5	2,63	119	64,06
14	20	1,2	2,88	160	4,3	2,87	131	53,25
15	20	0,4	2,02	140	4,5	3,40	152	53,95
16	20	0,8	3,42	100	4,4	4,83	213	46,59

Источник: составлено автором на основании проведенных лабораторных исследований

Таблица 11 показывает, что при проведении всех экспериментов сушки казеина, каждый уровень любого фактора влияющего на сушку казеина встречается один раз для каждого уровня всех остальных факторов, т.е каждый уровень задается столько раз, сколько принято уровней факторов. Усреднение результатов (16)

опытов сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве представлены в таблице 12. Проводились многократные измерения и опыты.

Усредненные расчетные значения частных функций представлены в таблице 13. Сравнение полученных усредненных расчетных значений (таблица 13) с экспериментальными данными (таблица 12) достаточно удовлетворительное их совпадение и в пределах точности неоднократно проведенных опытов.

Таблица 12 – Усреднение результатов (16) опытов сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве

	Функция	Уровни				Среднее значение
		1	2	3	4	
<i>1. Качественны показатели сухого казеина, А, балл</i>						
1	A_1	4,25	4,18	4,15	4,18	4,19
2	A_2	4,33	4,08	4,08	4,28	4,19
3	A_3	4,35	4,30	4,28	3,83	4,19
4	A_4	4,40	4,25	3,73	4,38	4,19
<i>2. Затраты электроэнергии, Q, кВт × ч/кг</i>						
1	Q_1	3,39	3,37	3,39	3,43	3,39
2	Q_2	3,97	3,17	3,36	3,08	3,39
3	Q_3	3,63	3,75	3,42	2,78	3,39
4	Q_4	4,88	2,75	2,59	3,35	3,39
<i>3. Продолжительность процесса сушки казеина, τ, мин</i>						
1	τ_1	152,00	152,25	151,50	153,75	152,38
2	τ_2	177,25	143,25	150,75	138,25	152,38
3	τ_3	161,50	169,00	153,75	125,25	152,38
4	τ_4	216,00	127,00	117,75	148,75	152,38

	Функция	Уровни				Среднее значение
		1	2	3	4	
<i>4. Предельное напряжение сдвига раствора казеина (20 %), Па.</i>						
1	P_1	55,75	54,57	55,12	54,46	54,98
2	P_2	50,75	58,24	57,64	53,28	54,98
3	P_3	52,68	50,75	54,94	61,54	54,98
4	P_4	47,02	54,87	65,10	52,92	54,98

Источник: составлено автором на основании проведенных лабораторных исследований

Таблица 13 – Усредненные расчетные значения частных функций

Функции эксперимента	Уровни				Среднее значение
	1	2	3	4	
$A_1(\text{балл}) = 4,856 - 0,0884x_1 + 0,00272x_1^2$	4,24	4,19	4,14	4,18	4,19
$A_2(\text{балл}) = 5,0822 - 2,48x_2 + 1,5056x_2^2$	4,33	4,06	4,10	4,27	4,19
$A_3(\text{балл}) = -2,7353 + 1,3206x_3 - 0,2615x_3^2$	4,34	4,37	4,19	3,86	4,19
$A_4(\text{балл}) = 8,482 - 0,0615x_4 + 0,00021x_4^2$	4,44	4,02	4,06	4,27	4,20
$Q_1 (\text{кВт} \times \text{ч/кг}) = 3,4975 - 0,0204x_1 + 0,00086x_1^2$	3,38	3,38	3,39	3,43	3,39
$Q_2 (\text{кВт} \times \text{ч/кг}) = 5,0611 - 3,3937x_2 + 1,5028x_2^2$	3,94	3,31	3,17	3,15	3,39
$Q_3 (\text{кВт} \times \text{ч/кг}) = 0,2913 + 2,7114x_3 - 0,525x_3^2$	3,63	3,75	3,42	2,78	3,39
$Q_4 (\text{кВт} \times \text{ч/кг}) = 22,658 - 0,265x_4 + 0,00087x_4^2$	4,89	2,70	2,66	3,32	3,39
$\tau_1(\text{мин}) = 160,024 - 1,243x_1 + 0,0463x_1^2$	152,23	151,78	151,80	153,69	152,38
$\tau_2(\text{мин}) = 222,413 - 139,25x_2 + 59,659x_2^2$	176,26	149,20	142,82	141,22	152,38
$\tau_3(\text{мин}) = 2,1503 + 128,63x_3 - 24,603x_3^2$	161,60	168,54	154,31	125,05	152,38
$\tau_4(\text{мин}) = 951,468 - 10,953x_4 + 0,0360x_4^2$	216,46	124,26	121,41	147,38	152,38

Функции эксперимента	Уровни				Среднее значение
	1	2	3	4	
$\Pi_1(\text{Па}) = 58,373 - 0,386x_1 + 0,00972x_1^2$	55,48	55,13	54,76	54,53	54,98
$\Pi_2(\text{Па}) = 30,38591 + 66,69688x_2 - 39,6321x_2^2$	50,72	58,38	57,45	53,35	54,98
$\Pi_3(\text{Па}) = 90,72292 - 30,828x_3 + 5,922081x_3^2$	52,62	51,06	54,56	61,67	54,98
$\Pi_4(\text{Па}) = -60,6713 + 1,602879x_4 - 0,00533x_4^2$	46,32	59,26	59,34	55,16	55,02

Источник: составлено автором на основании проведенных лабораторных исследований

Из табл. 12 и 13 видно, что средние значения органолептических показателей $A=4,18$ балл, энергозатрат $Q = 3,39$ кВт×ч/кг, времени процесса сушки $\tau=152,38$ минут, и предельного напряжения сдвига раствора казеина (20 %) $\Pi=54,97$ Па равны расчетным значениям.

Для проверки адекватности принятых параметров режима сушки казеина и их значимости проводили с определением доверительного интервала на основе коэффициента линейной корреляции [35, 36, 23]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1) \times \sum_1^N (Y_{\varepsilon} - Y_m)^2}{(N-K-1) \times \sum_1^N (Y_{\varepsilon} - Y_c)^2}}, \quad (73)$$

Критерий значимости для 5%-ного уровня:

$$t = \frac{R \times \sqrt{N-K-1}}{1-R^2}, \quad (74)$$

где N – число описываемых точек;

k – число действующих факторов;

Y_{ε} – экспериментальный результат;

Y_{CP} – среднее экспериментальное значение;

Y_P – расчетный результат.

В результате обработки данных были получены результаты оценки значимости факторов для 5 %-ного уровня, если критерий значимости меньше 2, то значимость не включают в обобщенную модель. Результаты расчетов представлены в табл. 14.

По результатам оценки значимости факторов в табл. 14, можно сделать выводы:

- функция показателя качества сухого казеина (12 %) A_4 , зависящая от температуры горячего воздуха не значима;
- напряжение сдвига раствора сухого казеина (20 %) $П_1$, зависящее от расстояния от объекта сушки казеина до излучателей ИК в камере не значимо;
- напряжение сдвига раствора сухого казеина (20 %) $П_4$, зависящее от температуры влажного воздуха в установке не значимо. Функции A_4 , $П_1$, $П_4$ можно не включать в обобщенную модель.

Таблица 14 – Результаты оценки значимости факторов

Функция сушки казеина	Значимость	R значения (коэффициента линейной корреляции)	t_R (критерий значимости)
A_1	Значима	0,966	$20,930 \geq 2$
A_2	Значима	0,984	$44,160 \geq 2$
A_3	Значима	0,945	$12,559 \geq 2$
A_4	<i>Не значима</i>	0,322	$0,508 < 2$
Q_1	Значима	0,930	$9,818 \geq 2$
Q_2	Значима	0,900	$6,723 \geq 2$
Q_3	Значима	0,999	$8729,360 \geq 2$
Q_4	значима	0,998	$387,314 \geq 2$
τ_1	Значима	0,896	$6,472 \geq 2$
τ_2	Значима	0,905	$7,150 \geq 2$
τ_3	Значима	0,999	$1826,800 \geq 2$
τ_4	значима	0,997	$241,805 \geq 2$
$П_1$	<i>Не значима</i>	0,497	$0,935 < 2$
$П_2$	значима	0,998	$574,062 \geq 2$

Функция сушки казеина	Значимость	R значения (коэффициента линейной корреляции)	t_R (критерий значимости)
P_3	Значима	0,996	$232,706 \geq 2$
P_4	<u>Не значима</u>	0,699	$1,933 < 2$

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

В результате современных математических статистических методов обработки данных были определены погрешности по каждой частной функции и от каждого параметра режима сушки. Результаты расчета представлены в табл. 15.

Таблица 15 – Результаты расчета квадратичной погрешности по каждой частной функции и от каждого параметра режима сушки

Функция процесса сушки	$\sum(Y_{\text{экс}} - Y_{\text{рас}})^2$	$\sum(Y_{\text{экс}} - Y_{\text{ср}})^2$
A_1	0,000245	0,005
A_2	0,00109	0,051
A_3	0,01264	0,178
A_4	0,178134	0,298
Q_1	0,000215	0,002
Q_2	0,06042	0,478
Q_3	0,00006	0,554
Q_4	0,007949	3,271
τ_1	0,367370	2,812
τ_2	108,00116	904,187
τ_3	0,56549	1097,312
τ_4	22,955124	5904,062
Π_1	0,526054	1,049
Π_2	0,06314	38,487

Функция процесса сушки	$\sum(Y_{\text{экс}}-Y_{\text{рас}})^2$	$\sum(Y_{\text{экс}}-Y_{\text{ср}})^2$
$П_3$	0,26744	66,216
$П_4$	57,909119	169,910

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Для получения обобщенных моделей процесса сушки казеина, использовали мультипликативную формулу *М.М. Протодьяконова* [36]:

$$Y_{об} = \frac{\prod_{i=1}^n Y_i}{Y_{-ср}^{n-1}}, \quad (75)$$

где $Y_{об}$ – обобщенная функция;

Y_i – частная функция.

В результате методом математической обработки были получены обобщенные уравнения для сушки казеина (76), (77), (78) и (79), отражающие зависимости:

y_1 – органолептические показатели сухого казеина, A , балл;

y_2 – энергозатраты на процесс сушки казеина Q , кВт×ч/кг;

y_3 – продолжительность процесса сушки казеина τ , мин;

y_4 – предельное напряжение сдвига раствора казеина (20 %) (θ_0^n), Па.

от:

x_1 – расстояния от объекта сушки до излучателей в экспериментальной установке h , см;

x_2 – толщина образца казеина в экспериментальной установке, см;

x_3 – плотность инфракрасного излучения в установке $q_{из}$, кВт/м²;

x_4 – температура влажного воздуха °С.

Имеют вид:

$$A=1/4,18^3 \times (4,856-0,088x_1+0,00272x_1^2) \times (5,082-2,487x_2+1,505x_2^2) \times (2,735+1,320x_3-0,261x_3^2), \quad (76)$$

$$Q=1/3,39^4 \times (3,497-0,020x_1+0,00086x_1^2) \times (5,0611-3,393x_2+1,502x_2^2) \times (0,291+2,711x_3-0,525x_3^2) \times (22,65-0,265x_4+0,00087x_4^2), \quad (77)$$

$$\tau = 1/152,3^4 \times (160,024 - 1,243x_1 + 0,0463x_1^2) \times (222,41 - 139,25x_2 + 59,659x_2^2) \times (2,1503 + 128,63x_3 - 24,603x_3^2) \times (951,46 - 10,95x_4 + 0,0360x_4^2), \quad (78)$$

$$П = 1/54,57^2 \times (30,385 + 66,69x_2 - 39,63x_2^2) \times (90,72 - 30,82x_3 + 5,922x_3^2), \quad (79)$$

Для разработанных обобщенных уравнений процесса сушки казеина (76), (77), (78) и (79) были определены коэффициенты корреляции и критерии значимости:

- для обобщенного уравнения показателя качества сухого казеина (12 %) A – коэффициент корреляции ($R = 0,96$) и критерий значимости ($t_R = 25,9$);
- для обобщенного уравнения расхода энергии Q – коэффициент корреляции составляет ($R = 0,95$) и критерий значимости ($t_R = 228,3$);
- для обобщенного уравнения продолжительности процесса сушки казеина τ – коэффициент корреляции ($R = 0,94$) и критерий значимости ($t_R = 520,55$);
- для обобщенного уравнения предельного напряжения сдвига раствора казеина (20 %) $П$ – коэффициент корреляции ($R = 0,99$) и критерий значимости ($t_R = 403,38$).

Таким образом, полученные обобщенные уравнения сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве позволяют:

- определить качество сухого казеина (12 %);
- определить расход энергии на сушку казеина;
- определить продолжительность процесса сушки;
- определить оптимальные параметры режима сушки;
- решить задачу оптимизации процесса;
- найти оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильного аппарата.

2.6 Исследование радиационно-конвективной сушки казеина с использованием критериев подобия теплообменных процессов

2.6.1 Исследование кинетики радиационно-конвективной сушки казеина

Радиационно-конвективная сушка казеина проводилась в экспериментальной установке (рисунок 22) при режимах:

$$1-t_3=100\text{ }^\circ\text{C}, h = 15\text{ см}, d = 0,4\text{ см}, q_{uz}=2,02\text{ кВт/м}^2;$$

$$2-t_3=140\text{ }^\circ\text{C}, h = 15\text{ см}, d= 1,2\text{ см}, q_{uz}=3,97\text{ кВт/м}^2. t_{uzl}=150\text{ }^\circ\text{C}$$

где t_3 – температура горячего воздуха в камере;

h – расстояние от образца казеина до излучателей;

d – толщина образца;

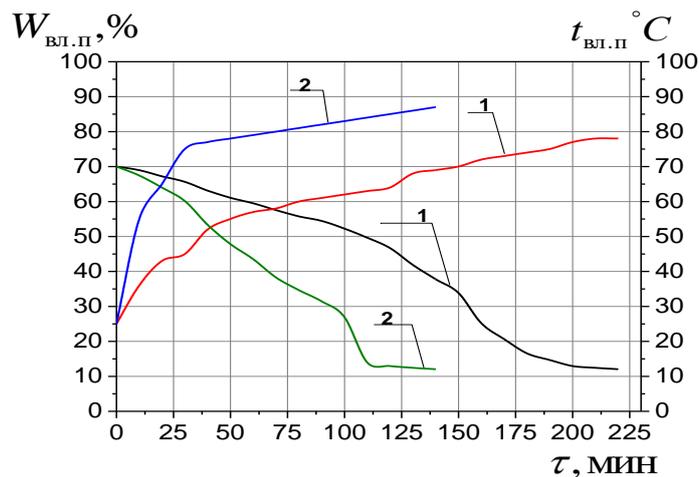
q_{uz} – плотность лучистого потока;

t_{uzl} – температура источника излучения.

На рисунке 23 – показаны кривые сушки $W_{\text{вл.п}} = f(t)$ и температурные кривые радиационно-конвективной сушки казеина при режимах:

$$1-t_3=100\text{ }^\circ\text{C}, h = 15\text{ см}, d = 0,4\text{ см}, q_{uz}= 2,02\text{ кВт/м}^2;$$

$$2-t_3=140\text{ }^\circ\text{C}, h = 15\text{ см}, d= 1,2\text{ см}, q_{uz}=3,97\text{ кВт/м}^2.$$



Режимы сушки 1- $t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$, $d = 0,4\text{ см}$, $q_{uz}= 2,02\text{ кВт/м}^2$; 2- $t_3=140\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$,
 $d= 1,2\text{ см}$, $q_{uz}=3,97\text{ кВт/м}^2$

Рисунок 23 – Кривые $W_{\text{вл.п}} = f(t)$ и температурные кривые $t_{\text{вл.п}} = f(\tau)$ радиационно-конвективной сушки казеина

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Анализируя кривые, можно сделать вывод, что кинетика сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве не отличается от кинетики сушки при конвективном нагреве. Сушку казеина в камере можно разделить на три этапа: перемещение и движение влаги внутри казеина по направлению к поверхности, парообразования в слоях казеина и перемещения пара от поверхности казеина в воздух. Наблюдаются три периода на кривых сушки $W_{\text{вл.п}} = f(t)$ и температурные кривые $t_{\text{вл.п}} = f(\tau)$: период нагрева, первый период сушки (постоянной), второй период (подающей скорости). Однако сушка казеина при инфракрасном и конвективном нагреве имеет высокую интенсивность испарения влаги с поверхности по сравнению с сушкой при конвективном нагреве. Регулярный режим нагревания казеина при изменении влагосодержания и температуры [76]:

$$\begin{aligned} -\frac{dW_{\text{вл.п}}}{d\tau} &= m_w \times (W_{\text{вл.п}} - W_p), \\ -\frac{dt_{\text{вл.п}}}{d\tau} &= m_t \times (t_3 - t_{\text{вл.п}}), \end{aligned} \quad (80)$$

где $W_{\text{вл.п}}$, $t_{\text{вл.п}}$ – влагосодержание и температура влажного продукта в процессе сушки;

W_p – равновесное влагосодержание продукта;

m_t , m_w – темп нагревания и убыли влагосодержания влажного продукта (мин^{-1}) находим из отношений:

$$tg\varphi_1 = \frac{\ln(W_{\text{кр}} - W_p) - \ln(W_{\text{вл.п}} - W_p)}{\tau - \tau_0} = m_w = const; \quad (81)$$

$$tg\varphi_2 = \frac{\ln(t_3 - t_{\text{вл.п1}}) - \ln(t_3 - t_{\text{вл.п}})}{\tau - \tau_0} = m_t = const, \quad (82)$$

где τ – текущее время сушки;

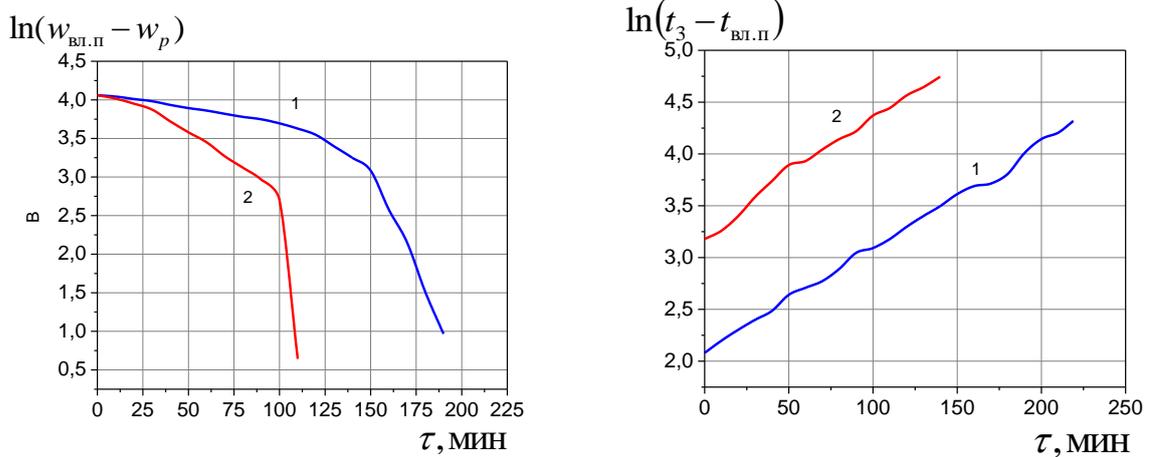
$W_{\text{кр}}$ – критическое влагосодержание казеина;

$t_{\text{вл.п1}}$ – температура влажного казеина в первом периоде сушки (постоянный период).

Температура влажного казеина в первом периоде сушки определяется [76]:

$$t_{\text{вл.п1}} = 10 + 0,29t_c. \quad (83)$$

На рисунке 24 изображены зависимости $\ln(W_{\text{вл.п}} - W_p)$ и $\ln(t_3 - t_{\text{вл.п}})$:



Режимы сушки 1- $t_3=100$ °С, $h = 15$ см, $d = 0,4$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 2- $t_3=140$ °С, $h = 15$ см,
 $d= 1,2$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²

Рисунок 24 – Зависимости $\ln(w_{\text{вл.п}} - w_p)$ и $\ln(t_3 - t_{\text{вл.п}})$ при радиационно-конвективной сушке казеина

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Время сушки в первом и во втором периоде сушки [76, 53, 54]:

$$\tau_1 = \frac{w_H - w_{\text{кр}}}{N}; \tau_2 = \frac{1}{m_t} \times \ln \left(\frac{t_3 - t_{\text{вл.п.1}}}{t_3 - t_{\text{вл.п.2}}} \right) \quad (84)$$

$$\text{или } \tau_2 = \frac{1}{m_w} \times \ln \left(\frac{w_{\text{кр}} - w_p}{w_{\text{вл.п}} - w_p} \right).$$

Тогда из уравнения (84) продолжительность сушки τ и температура влажного казеина $t_{\text{вл.п}}$ до заданного влагосодержания (12 %) будет:

$$\tau = \frac{w_H - w_{\text{кр}}}{N} + \frac{1}{m_w} \times \ln \left(\frac{w_{\text{кр}} - w_p}{w_{\text{вл.п}} - w_p} \right), \quad t_{\text{вл.п}} = t_3 - \frac{t_c - t_{\text{вл.п}}}{\exp(m_t \tau)}. \quad (85)$$

де N – скорость сушки в первом периоде;

w_0 – начальная влажность казеина, $m_t=0,01$ мин⁻¹.

Для проверки степени достоверности полученных результатов исследования сушки казеина приведено сравнение экспериментальных и расчетных данных (по уравнениям (85), значения времени сушки и температуры казеина, представленные в таблице 16. Видно, что расчетные значения времени сушки и температуры казеина, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Таблица 16 – Экспериментальные и расчетные данные времени сушки и температуры казеина

$t_3=100^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, d = 0,4 \text{ см}, q_{из}=2,02$ кВт/м ²					$t_3=140^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, d= 1,2 \text{ см}, q_{из}= 3,97$ кВт/м ²				
$W_{\text{вл.п}}$, %	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	$\tau_{\text{расч}}, \text{мин}$ (85)	$t_{\text{вл.п}}$ (ЭКС)	$t_{\text{вл.п}}$ (85)	$W_{\text{вл.п}}, \%$	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	$\tau_{\text{расч}}, \text{мин}$ (85)	$t_{\text{вл.п}}$ (ЭКС)	$t_{\text{вл.п}}$ (85)
70,00	0	0	25	25,0	70,00	0	0	25	25
68,96	10	9,51	33	32,1	67,44	10	12,61	36	35,9
67,21	20	18,6	37	38,6	63,99	20	23,7	44	45,8
65,62	30	27,69	45	44,4	60,13	30	32,79	55	54,8
63,10	40	38,78	55	49,7	53,31	40	42,88	61	62,9
61,06	50	47,76	59	54,5	47,83	50	51,97	72	70,2
59,49	60	62,96	60	58,8	43,50	60	59,06	77	76,9
57,54	70	69,05	63	62,8	38,27	70	72,15	83	82,9
55,75	80	78,14	67	66,3	34,64	80	84,24	89	88,3
54,44	90	86,23	70	69,5	31,43	90	93,33	91	90,1
52,23	100	98,32	73	72,4	26,92	100	104,42	98	97,7
49,62	110	113,41	76	75,0	13,92	120	125,51	104	105,4
46,67	120	124,50	78	77,4	12,92	130	133,60	110	108,7
41,86	130	133,59	79	79,6	12,41	140	142,69	114	111,6
37,76	140	141,68	82	81,5	12,02	147	150,42	116	112,2
33,85	150	157,77	84	83,3	–	–	–	–	–
25,19	160	162,86	85	84,9	–	–	–	–	–
20,63	170	173,95	86	86,3	–	–	–	–	–
16,55	180	181,04	88	87,6	–	–	–	–	–
14,65	190	194,13	89	88,8	–	–	–	–	–

$t_3=100^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, d = 0,4 \text{ см}, q_{из}=2,02$ кВт/м ²					$t_3=140^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, d= 1,2 \text{ см}, q_{из}= 3,97$ кВт/м ²				
$W_{\text{вл.п}}$, %	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	$\tau_{\text{расч}}, \text{мин}$ (85)	$t_{\text{вл.п}}$ (экс)	$t_{\text{вл.п}}$ (85)	$W_{\text{вл.п}}, \%$	$\tau_{\text{экс}}, \text{мин}$	$\tau_{\text{расч}}, \text{мин}$ (85)	$t_{\text{вл.п}}$ (экс)	$t_{\text{вл.п}}$ (85)
12,92	200	203,22	90	89,8	–	–	–	–	–
12,41	210	214,31	91	90,8	–	–	–	–	–
12,02	219	225,40	92	91,0	–	–	–	–	–

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

2.6.2 Исследование процесса сушки казеина с использованием критериев подобия теплообмена

Для расчета и исследования кинетики процесса сушки казеина и построения расчетных графических зависимостей воспользуемся критерием *Больцмана* [82, 53, 54]:

$$Bo = \frac{\lambda}{\varepsilon_{\text{пр}} \times \zeta_0 \times T_{\text{изл}}^3 \times d}, \quad (86)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – степень черноты;

ζ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\zeta_0 = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \times \text{К}^4$;

λ – коэффициент теплопроводности.

Критерий *Больцмана* (Bo) для сухих образцов имеет вид:

$$Bo_0 = \frac{\lambda_{\text{сух}}}{\varepsilon_{\text{пр}} \times \zeta_0 \times T_{\text{изл}}^3 \times d}, \quad (87)$$

где $\lambda_{\text{сух}}$ – коэффициент теплопроводности влажного казеина.

Для влажного казеина критерий Bo_w :

$$Bo_{\text{вл.п}} = \frac{\lambda_{\text{вл.п}}}{\varepsilon_{\text{пр}} \times \zeta_0 \times T_{\text{изл}}^3 \times d}, \quad (88)$$

где $\lambda_{\text{вл.п}}$ – коэффициент теплопроводности влажного казеина.

Влажность казеина ($W_{\text{вл.п}}$) влияет значительно на теплопроводность ($\lambda_{\text{вл.п}}$) и теплоемкость ($c_{\text{вл.п}}$) и выражаются [84, 57, 58]:

$$\lambda_{\text{вл.п}} = \lambda_{\text{сух}} + 0,0014 \times W_{\text{вл.п}}, \quad (89)$$

$$c_{\text{вл.п}} = \frac{c_{\text{сух}} + c_{\text{Воды}} \times (W_{\text{вл.п}}/100)}{1 + (W_{\text{вл.п}}/100)}, \quad (90)$$

где $c_{\text{Воды}}$ – теплоемкость воды;

$c_{\text{вл.п}}$ – теплоемкость сухого казеина.

Коэффициент температуропроводности ($a_{\text{вл.п}}$) влажного казеина вычислялся по формуле:

$$a_{\text{вл.п}} = \frac{\lambda_{\text{вл.п}}}{c_{\text{вл.п}} \times \rho_{\text{вл.п}}}, \quad (91)$$

где $\rho_{\text{вл.п}}$ – плотность влажного казеина измерялась в процессе сушки весовым способом.

Критерий Фурье Fo определяется по формуле:

$$Fo = \frac{a_{\text{вл.п}} \times \tau}{d^2}, \quad (92)$$

В таблице 17 представлены зависимости коэффициентов переноса тепла от влажности казеина.

Таблица 17 – Зависимости коэффициентов переноса тепла от влажности казеина

$t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h=15\text{ см}$, $d=0,4\text{ см}$, $q_{\text{уз}}=2,02\text{ кВт/м}^2$, $c_{\text{сух}}=1713,6$, $\lambda_{\text{сух}}=0,13\text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$					$t_3=140\text{ }^\circ\text{C}$, $h=15\text{ см}$, $d=1,2\text{ см}$, $q_{\text{уз}}=3,97\text{ кВт/м}^2$, $c_{\text{сух}}=1713,6$, $\lambda_{\text{сух}}=0,13\text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$				
$W, \%$	$\frac{\lambda_{\text{вл.п}}, \text{ Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$	$\rho_{\text{вл.п}}, \text{ кг/м}^3$	$a_{\text{вл.п}}, 10^8, \text{ м}^2/\text{ч}$	$c_{\text{вл.п}}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$W, \%$	$\frac{\lambda_{\text{вл.п}}, \text{ Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$	$\rho_{\text{вл.п}}, \text{ кг/м}^3$	$a_{\text{вл.п}}, 10^8, \text{ м}^2/\text{ч}$	$c_{\text{вл.п}}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$
70,00	0,228	11167,7	0,749	2726,7	70,00	0,228	3722,6	2,25	2726,7
68,96	0,227	10793,6	0,774	2717,8	67,44	0,224	3430,3	2,41	2704,6
67,21	0,224	10218,4	0,811	2702,6	63,99	0,220	3100,9	2,65	2673,7
65,62	0,222	9743,8	0,847	2688,4	60,13	0,214	2801,2	2,90	2637,5
63,10	0,218	9079,3	0,901	2665,5	53,31	0,205	2391,7	3,34	2569,1
61,06	0,215	8604,7	0,944	2646,4	47,83	0,197	2140,5	3,67	2509,7

$t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h=15\text{ см}$, $d=0,4\text{ см}$, $q_{из}=2,02\text{ кВт/м}^2$, $c_{сyx}=1713,6$, $\lambda_{сyx}=0,13\text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$					$t_3=140\text{ }^\circ\text{C}$, $h=15\text{ см}$, $d=1,2\text{ см}$, $q_{из}=3,97\text{ кВт/м}^2$, $c_{сyx}=1713,6$, $\lambda_{сyx}=0,13\text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$				
$W, \%$	$\lambda_{вл.п}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{}^\circ\text{C}}$	$\rho_{вл.п}, \text{кг/м}^3$	$a_{вл.п}, 10^8, \text{м}^2/\text{ч}$	$c_{вл.п}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$	$W, \%$	$\lambda_{вл.п}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{}^\circ\text{C}}$	$\rho_{вл.п}, \text{кг/м}^3$	$a_{вл.п}, 10^8, \text{м}^2/\text{ч}$	$c_{вл.п}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$
59,49	0,213	8269,7	0,979	2631,3	43,50	0,191	1976,7	3,93	2459,4
57,54	0,211	7890,0	1,024	2612,2	38,27	0,184	1809,2	4,25	2394,6
55,75	0,208	7571,7	1,059	2594,3	34,64	0,178	1708,7	4,44	2346,6
54,44	0,206	7353,9	1,085	2580,9	31,43	0,174	1628,6	4,64	2302,0
52,23	0,203	7013,3	1,132	2557,8	26,92	0,168	1528,1	4,92	2235,5
49,62	0,199	6650,4	1,183	2529,6	13,92	0,149	1297,3	5,70	2014,2
46,67	0,195	6281,8	1,243	2496,5	12,92	0,148	1282,4	5,78	1995,1
41,86	0,189	5762,5	1,344	2439,6	12,41	0,147	1275,0	5,81	1985,2
37,76	0,183	5382,8	1,424	2388,0	12,02	0,147	1269,4	5,86	1977,6
33,85	0,177	5064,5	1,496	2335,8	–	–	–	–	–
25,19	0,165	4478,2	1,668	2208,7	–	–	–	–	–
20,63	0,159	4221,4	1,765	2134,4	–	–	–	–	–
16,55	0,153	4014,8	1,847	2063,0	–	–	–	–	–
14,65	0,151	3925,4	1,897	2028,0	–	–	–	–	–
12,92	0,148	3847,3	1,928	1995,1	–	–	–	–	–
12,41	0,147	3824,9	1,936	1985,2	–	–	–	–	–
12,02	0,147	3808,2	1,952	1977,6	–	–	–	–	–

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Анализ экспериментальных данных

Критерий *Больцмана* влажного казеина ($Bo_{вл.п}$) зависит в значительной степени от ($t_{из}$) температуры излучателя, и от ($\lambda_{вл.п}$) коэффициента теплопроводности

влажного продукта. Относительная температура влажного казеина задается отношением [84, 57, 58]:

$$T_{\text{вл.п}}^* = \frac{t_3 - \bar{t}_{\text{вл.п}}}{t_3 - \bar{t}_{\text{вл.п1}}}, \quad (93)$$

На рисунке 25 показаны зависимости относительной температуры $T_{\text{вл.п}}^*$ от отношения критериев $Bo_{\text{вл.п}}/Bo_{\text{сух}}$ и $T_{\text{вл.п}}^* = \int(Bo_{\text{вл.п}})$ в процессе сушки казеина при режимах:

$$1-t_3=100 \text{ }^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, d = 0,4 \text{ см}, q_{\text{уз}}= 2,02 \text{ кВт/м}^2;$$

$$2-t_3=140 \text{ }^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, d= 1,2 \text{ см}, q_{\text{уз}}=3,97 \text{ кВт/м}^2.$$

Зависимости относительной температуры $T_{\text{вл.п}}^*$ от отношения критериев $Bo_{\text{вл.п}}/Bo_{\text{сух}}$ и $T_{\text{вл.п}}^* = \int(Bo_{\text{вл.п}})$ зависимость описываются следующими уравнениями:

$$T^* = 0,15 + 0,32 \times \frac{Bo_{\text{вл.п}}}{Bo_{\text{сух}}}, \quad (94)$$

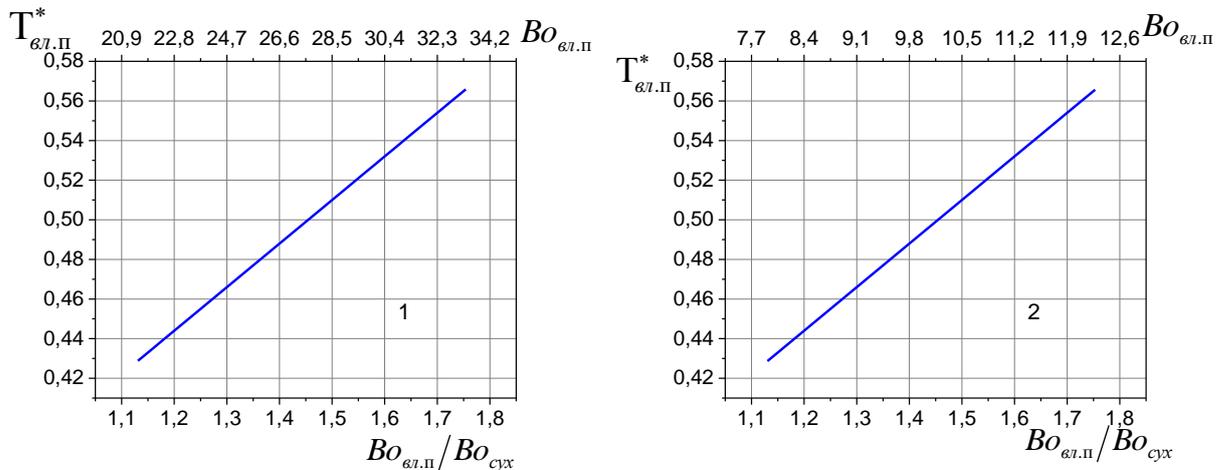


Рисунок 25 – Зависимости относительной температуры $T_{\text{вл.п}}^*$ от отношения критериев

$$Bo_{\text{вл.п}}/Bo_{\text{сух}} \text{ и } T^* = \int(Bo_{\text{вл.п}}) \text{ в процессе сушки казеина}$$

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

На рисунке 26 представлены зависимости критерия $Bo_{\text{вл.п}} = \int(Fo)$ и относительной температуры $T_{\text{вл.п}}^* = \int(Fo)$ в процессе сушки при режимах:

$$1-t_3=100 \text{ }^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, d = 0,4 \text{ см}, q_{\text{уз}}=2,02 \text{ кВт/м}^2;$$

$$2-t_3=140 \text{ }^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, d= 1,2 \text{ см}, q_{\text{уз}}=3,97 \text{ кВт/м}^2.$$

Зависимость $T_{\text{вл.п}}^* = \int(Fo)$ представляется:

$$T_{\text{вл.п}}^* = e(-0,01 \times Fo). \quad (95)$$

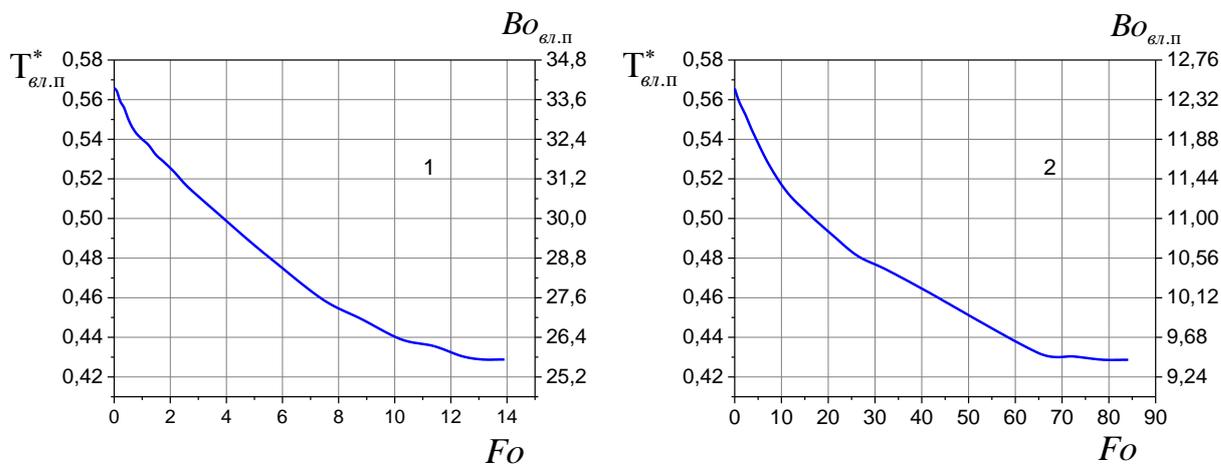


Рисунок 26 – Зависимости относительной температуры $Bo_w = \int(Fo)$ и $T_{\text{вл.п}}^* = \int(Fo)$ в процессе сушки

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Для расчета продолжительности сушки используется следующая зависимость [81]:

$$\bar{U} = \int(\tau) = \frac{W_{\text{вл.п}} - W_P}{W_n - W_P}, \quad (96)$$

где \bar{U} – безразмерное влагосодержание казеина;

$W_n, W_{\text{вл.п}}, W_P$ – начальное, текущее и равновесное влагосодержание казеина.

Из решения зависимости (119) время сушки находится:

$$\lg \bar{U} = \lg \frac{W_{\text{вл.п}} - W_P}{W_n - W_P} = f(\tau). \quad (97)$$

В работе [77] было получено уравнение для определения продолжительности сушки:

$$\tau = -\frac{1}{k_{\text{коф}}} \times \lg \frac{W_{\text{вл.п}} - W_P}{W_n - W_P}. \quad (98)$$

где $k_{\text{коф}}$ – коэффициент сушки, $k_{\text{коф}} = 5 \times 10^{-3} \times W_n - 0,3$.

Зависимость относительного влагосодержания $Lg\bar{U} = \int(\tau)$ для процесса сушки казеина в форме пластины при разных режимах: ($1-t_3=100$ °С, $h = 15$ см,

$d = 0,4$ см, $q_{из}=2,02$ кВт/м²; $2-t_3=140$ °С, $h = 15$ см, $d = 1,2$ см, $q_{из}=3,97$ кВт/м²), представлена на рисунке 27.

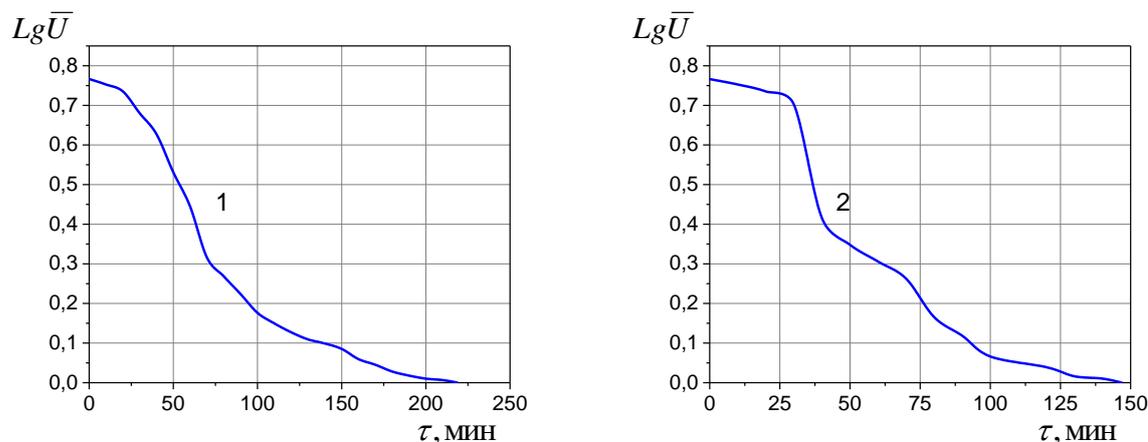


Рисунок 27 – Зависимость относительного влагосодержания $Lg\bar{U} = \int(\tau)$ в процессе сушки казеина в форме пластины

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

В процессе сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве критерий *Больцмана* Bo_W и плотность теплового потока ИК-излучения являются функциями влагосодержания $W_{вл.п}$ продукта.

С помощью уравнения *Стефана-Больцмана* установили связи критерия *Больцмана* и теплового потока ИК-излучения с влагосодержанием казеина $Bo_{вл.п} = \int(W_{вл.п})$, $q_{изл} = \int(W_{вл.п})$. Формула излучения *Стефана-Больцмана* [54, 57, 58]:

$$q_{изл} = \varepsilon_{пр} \times C_{из} \times \left(\frac{T_{изл}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{пов}}{100}\right)^4 \times \varphi \left(\frac{W_{вл.п}}{W_{кр}}\right)^{0,5}, \quad (99)$$

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (100)$$

где $C_{из}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\varphi = 1$ – угловой коэффициент излучения;

$\varepsilon_{пр}$ – степень черноты системы излучатель–продукт.

Зависимость $Bo_{вл.п} = \int(W_{вл.п})$ представлена на рисунке 28 выражается следующей формулой:

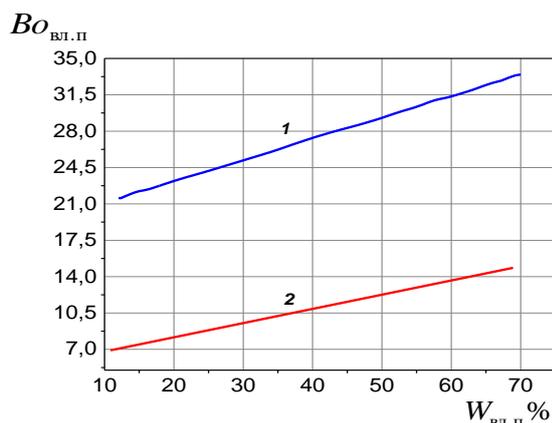
$$Bo_{вл.п} = 0,09 \times t_{вл.п} + 0,21 \times W_{вл.п}, \quad (101)$$

Зависимость $q_{\text{изл}} = \int(W_{\text{вл.п}})$ представлена на рисунке (29) выражается следующей формулой [81]:

$$q_{\text{изл}} = m \cdot e \times (0,011 \times W_{\text{вл.п}}). \quad (102)$$

где m – константа вычисляется:

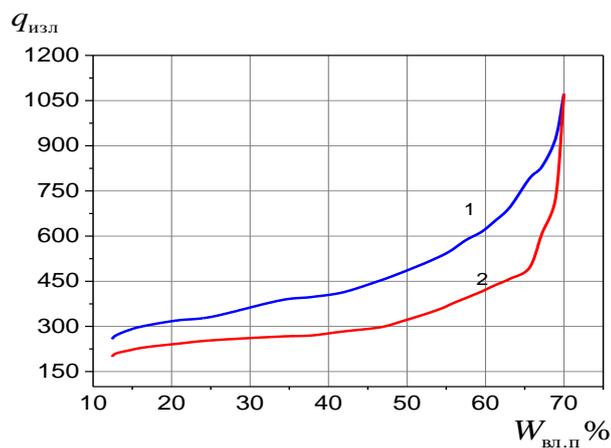
$$m = 10^3 \times \left(1,6 - 1,7 \times \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{изл}}} \right). \quad (103)$$



1- $t_3=100$ °C, $h = 15$ см, $d = 0,4$ см, $q_{\text{уз}} = 2,02$ кВт/м²; 2- $t_3=140$ °C, $h = 15$ см,
 $d = 1,2$ см, $q_{\text{уз}} = 3,97$ кВт/м²

Рисунок 28 – Зависимость $Vo_{\text{вл.п}} = \int(W_{\text{вл.п}})$ в процессе сушки казеина

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



1- $t_3=100$ °C, $h = 15$ см, $d = 0,4$ см, $q_{\text{уз}}=2,02$ кВт/м²; 2- $t_3=140$ °C, $h = 15$ см,
 $d = 1,2$ см, $q_{\text{уз}}=3,97$ кВт/м².

Рисунок 29 – Зависимость $q_{\text{изл}} = \int(W_{\text{вл.п}})$ в процессе сушки казеина

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Для исследования теплообмена сушки казеина использовались также критериальные уравнения [53,54]:

$$Nu = 0,87 \times Re^{0,5} \times \left(\frac{T_3}{T_M}\right)^2 \times \left(\frac{T_{изл}}{T_3}\right)^{0,45} \times \varphi \times \left(\frac{W_{вл.п}}{W_{кр}}\right)^{0,5}, \quad (104)$$

где $Nu = \bar{\alpha} \times l / \lambda_B$ – критерий Нуссельта;

$T_{изл}, T_{M.T}$ – абсолютная температура излучателя и температура мокрого термометра;

l – длина образца казеина;

v – скорость потока горячего воздуха, $v \times l / \nu_B$ – критерий Рейнольдса;

λ_B, ν_B – теплопроводность и кинематическая вязкость горячего воздуха.

Плотность теплового потока ИК-излучения определили с помощью уравнения теплообмена [53, 54]:

$$q_{из} = \bar{\alpha} \times (t_3 - t_n), \quad (105)$$

где t_n – температура поверхности казеина;

α – коэффициент теплообмена.

Расчетные значения теплового потока ИК-излучения по уравнениям (104), (99), (102) и (105) представлены в таблице 18 и 19.

Таблица 18 – Сравнение расчетных значений тепловых потоков по уравнениям (104), (99), (102) и (105) для режима сушки $t_3=100$ °C, $h = 15$ см, $d= 0,4$ см, $q_{из}=2,02$ кВт/м²

$W, \%$	$\bar{\alpha}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ (104)	$q_{из}, \text{Вт/м}^2$ (99)	$q_{из}, \text{Вт/м}^2$ (102)	$q, \text{Вт/м}^2$ (105)
70,00	77,60	1039,08	1072,08	1229,08
68,96	76,61	892,22	925,22	1081,22
67,21	75,62	797,63	830,63	985,63
65,62	75,63	758,23	791,23	945,23
63,10	75,64	662,21	695,21	848,21

$W, \%$	$\bar{\alpha}, \text{BT}/\text{M}^2 \cdot \text{K}$ (104)	$q_{uz}, \text{BT}/\text{M}^2$ (99)	$q_{uz}, \text{BT}/\text{M}^2$ (102)	$q, \text{BT}/\text{M}^2$ (105)
61,06	74,65	613,56	646,56	798,56
59,49	72,66	580,43	613,43	764,43
57,54	71,67	553,83	586,83	736,83
55,75	70,68	521,25	554,25	703,25
54,44	68,69	502,07	535,07	683,07
52,23	65,70	476,32	509,32	656,32
49,62	62,71	448,71	481,71	627,71
46,67	58,72	419,94	452,94	597,94
41,86	54,73	380,11	413,11	557,11
37,76	50,74	364,16	397,16	540,16
33,85	41,75	353,50	386,50	528,50
25,19	37,76	299,17	332,17	473,17
20,63	32,77	286,45	319,45	459,45
16,55	30,78	268,45	301,45	440,45
14,65	29,79	255,24	288,24	426,24
12,92	28,80	236,92	269,92	406,92
12,41	27,60	224,59	257,59	393,59

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Таблица 19 – Сравнение расчетных значений тепловых потоков по уравнениям (104), (99), (102) и (105) для режима сушки $t_3=140 \text{ }^\circ\text{C}$, $h = 15\text{см}$, $d= 1,2 \text{ см}$, $q_{uz} = 3,97 \text{ кВт}/\text{м}^2$

$W, \%$	$\bar{\alpha}, \text{BT}/\text{M}^2 \cdot \text{K}$ (104)	$q_{uz}, \text{BT}/\text{M}^2$ (99)	$q_{uz}, \text{BT}/\text{M}^2$ (102)	$q, \text{BT}/\text{M}^2$ (105)
70,00	77,60	1039,08	1072,08	1183,08

$W, \%$	$\bar{\alpha}, \text{BT}/\text{M}^2 \cdot \text{K}$ (104)	$q_{\text{из}}, \text{BT}/\text{M}^2$ (99)	$q_{\text{из}}, \text{BT}/\text{M}^2$ (102)	$q, \text{BT}/\text{M}^2$ (105)
67,44	76,61	694,96	727,96	837,96
63,99	75,62	575,10	608,10	717,10
60,13	75,63	461,95	494,95	602,95
53,31	75,64	424,51	457,51	564,51
47,83	74,65	401,48	434,48	540,48
43,50	72,66	382,31	415,31	520,31
38,27	71,67	361,48	394,48	498,48
34,64	70,68	342,50	375,50	478,50
31,43	68,69	326,82	359,82	461,82
26,92	65,70	306,86	339,86	440,86
13,92	62,71	285,86	318,86	418,86
12,92	58,72	264,31	297,31	396,31
12,41	54,73	249,92	282,92	380,92
12,02	50,74	236,77	269,77	366,77

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Таким образом, в результате математической обработки и анализа экспериментальных данных сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве:

- установлены основные закономерности и методы расчета параметров кинетики сушки;
- получены уравнения для определения времени сушки казеина;
- получены уравнения для определения температуры казеина в процессе сушки;

– получены уравнения для определения плотности теплового потока ИК - излучения в процессе сушки;

– представлено сопоставление расчетных и экспериментальных значений параметров сушки. Сравнение расчетных значений и экспериментальных по предлагаемым уравнениям показало достаточно адекватное их совпадение.

2.7 Исследование реологических показателей сухого казеина

Реологические показатели сухого казеина являются важными характеристиками в процессе сушки. Знание физико-механических характеристик позволяют управлять структурой и качеством готового продукта путем изменения параметров сырья и температурных режимов сушки.

2.7.1 Исследование насыпной плотности сухого казеина

Важной характеристикой сухого казеина является насыпная плотность, по значениям которой можно судить об эффективности сушки и пригодности порошка к длительному хранению. Исследование насыпной плотности проведено согласно (ГОСТ Р ИСО 8967-2010. Молоко сухое и сухие молочные продукты. Определение насыпной плотности).

Сущность метода: на контрольную пробу сухого казеина в мерном цилиндре воздействуют ударом. После определенного количества ударов регистрируют объем продукта и рассчитывают его насыпную плотность. Для проведения экспериментальных исследований насыпной плотности казеина был использован анализатор «AutoTap».

В качестве объекта исследования были использованы образцы сухого казеина получены при режимах сушки:

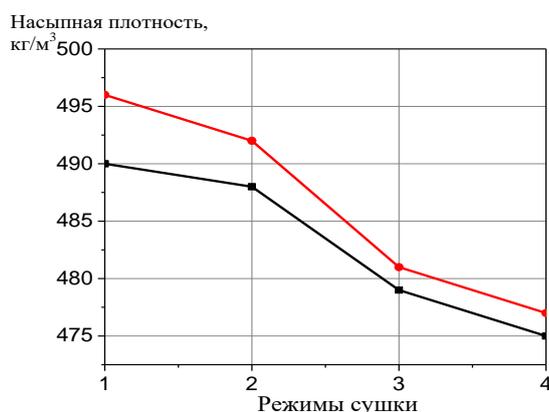
$$t_3=100 \text{ } ^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, q_{u3}=2,02 \text{ кВт/м}^2 ;$$

$$t_3=140 \text{ } ^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, q_{uz}=3,97 \text{ кВт/м}^2 ;$$

$$t_3=160 \text{ } ^\circ\text{C}, h = 15 \text{ см}, q_{uz}=3,42 \text{ кВт/м}^2 ;$$

$$t_3=180 \text{ } ^\circ\text{C}, h = 10 \text{ см}, q_{uz}=2,88 \text{ кВт/м}^2 .$$

На рисунке 30 показана зависимость насыпной плотности от режима сушки казеина. Из графических зависимостей следует, что с увеличением количества ударов на образец происходит увеличение насыпной плотности, следовательно, уменьшение объема. С увеличением температуры теплоносителя в процессе сушки повышается насыпная плотность казеина.



● – плотность после 100 ударов, ■ – плотность после 620 ударов

Рисунок 30 – Зависимость насыпной плотности от режима сушки казеина

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

2.7.2 Исследование эффективной вязкости раствора казеина (20 %)

Эффективную вязкость раствора казеина (20 %) исследовали на ротационном вискозиметре «Реотест». В результате полученные данные обрабатывали с помощью ПК в программе *Table Curve 2D v5.01*.

Анализ кривых течения опытных образцов раствора казеина 20 % (рис. 31) показывает, что раствор относится к средам, обладающим вязкостью и пластичностью. Для разрушения структуры раствора казеина номер 1 требуется больше усилий, чем для разрушения структуры казеина номер 2, 3 и 4. Следовательно, использование низкой температуры теплоносителя позволяет улучшить качество сухого казеина и его раствора.

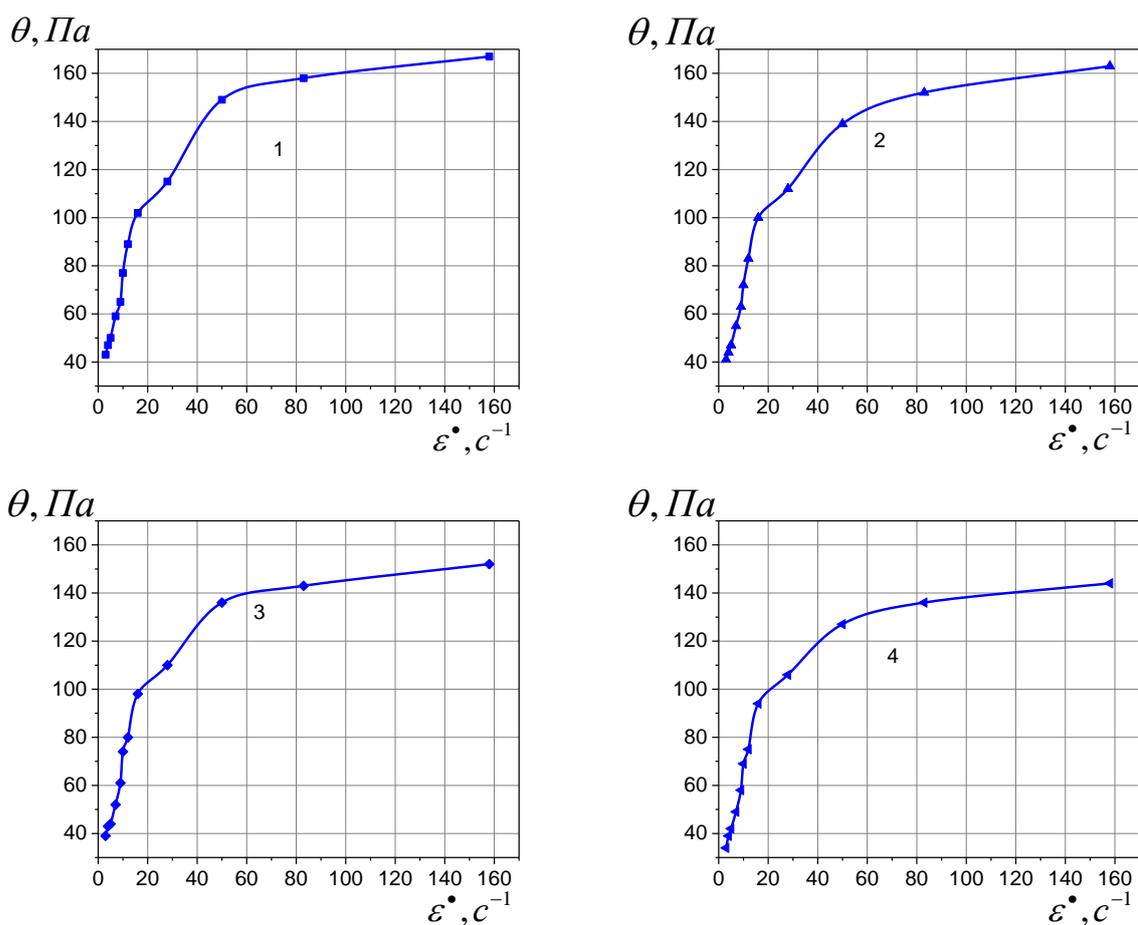


Рисунок 31 – Изменение зависимости напряжения сдвига θ, Pa от скорости сдвига раствора $\dot{\epsilon}, c^{-1}$ казеина 20 % номер 1,2,3 и 4

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Обработка данных кривых течения методами математической статистики, позволила получить уравнения зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига, адекватно отражающие результаты исследований, так как доверительный интервал находится в пределах от 0,91 до 0,99.

Таблица 20 – Уравнения зависимости напряжения сдвига

Номер образцов	Уравнение	Доверительный интервал (r^2)
1	$\theta = 49,99 \times \dot{\epsilon}^{0.27}$	$r^2 = 0,91$
2	$\theta = 35,88 \times \dot{\epsilon}^{0.88}$	$r^2 = 0,85$
3	$\theta = 32,30 \times \dot{\epsilon}^{0.622}$	$r^2 = 0,90$
4	$\theta = 27,33 \times \dot{\epsilon}^{0.369}$	$r^2 = 0,92$

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

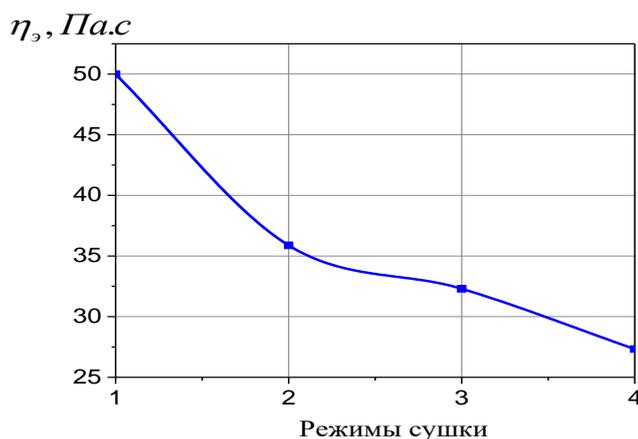


Рисунок 32 – Изменение эффективной вязкости образцов раствора казеина в зависимости от режима сушки (номер 1, 2, 3 и 4)

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Как видно из данных рисунка 32, эффективная вязкость раствора казеина номер 1 выше эффективной вязкости образцов номер 2, 3 и 4. Полученные результаты подтверждают, что уменьшение температуры теплоносителя в процессе сушки казеина позволяет увеличить качество сухого казеина и вязкость его раствора.

Выводы по второй главе

Для моделирования процесса радиационно-конвективной сушки казеина была разработана иерархическая структура и вербальное описание процессов на взаимосвязанных уровнях иерархии с использованием системного анализа в условиях комбинированного инфракрасного и конвективного нагрева

Иерархическая структура процесса сушки казеина определяет все многообразие задач моделирования и оптимизации процесса получения качественного казеина и эффективности сушки при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве.

– Предложена структурно-параметрическая модель сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве, которая позволяет: решить задачу диагностирования аномальной ситуации радиационно-конвективной сушки казеина; компьютеризировать диагностику и прогнозирование состояния процесса сушки; обеспечить компьютерный контроль и управление радиационно-

конвективной сушки с принятием оптимальных решений; определить оптимальные параметры режима сушки; найти оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильного аппарата.

– Для обоснования оптимальных параметров режима сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве был проведен планированный эксперимент в виде греко-латинского квадрата и получены обобщенные уравнения процесса сушки казеина, которые позволяют определить качество сухого казеина (12 %); расход энергии на сушку казеина; продолжительность процесса сушки; рациональные параметры режима сушки; решить задачи оптимизации процесса; найти оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильного аппарата.

– Исследовали сушку казеина при инфракрасном и конвективном нагреве с использованием критериев подобия теплообмена и были установлены основные закономерности и методы расчета параметров кинетики сушки; получены уравнения для определения времени сушки казеина; уравнения для определения температуры казеина в процессе сушки; уравнения для определения плотности теплового потока ИК-излучения в процессе сушки.

– Исследовали насыпную плотность сухого казеина и эффективную вязкость раствора казеина (20 %). Знание физико-механических характеристик позволяют управлять структурой и качеством сухого казеина путем изменения параметров сырья и температурных режимов сушки.

Глава 3 Моделирование тепломассообменных процессов радиационно-конвективной сушки казеина и анализ результатов

3.1 Математическое описание влагопереноса в частице казеина в период постоянной скорости сушки

В исследованиях использовали вариант сушки проточным горячим воздухом с дополнительным подводом ИК- энергии (рисунок 15).

В период постоянной скорости сушки дифференциальное уравнение массопроводности с постоянным коэффициентом влагопроводности имеет вид [74, 72, 70, 64, 65]:

$$\frac{\partial w(r, \tau)}{\partial \tau} = k \times \left[\frac{\partial^2 w(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \times \frac{\partial w(r, \tau)}{\partial r} \right]; (\tau > 0; 0 \leq r \leq R), \quad (106)$$

где r – координата по толщине образцов казеина(м);

τ – время сушки(с);

R – половина толщины продукта (м);

k – коэффициент влагопроводности, м²/с;

Γ – коэффициент = 0.

Для математического описания переноса влаги в слоях казеина в период постоянной скорости сушки запишем следующие уравнения:

– уравнение материального баланса в камере сушилки [64,65]:

$$G_{в} \times \frac{dx_2}{d\tau} + G_{с.п} \times \frac{dw_{с.п}}{d\tau} = L_e \times [x_3 - x_2], \quad (107)$$

где $G_{в} = \rho_{в} \times V_{в}$ – плотность и объем воздуха, кг;

$G_{с.п}$ – масса влажного продукта, кг, $G_{с.п} = \rho_{с.п} \times V_{с.п}$;

x_2 – влажность горячего воздуха камеры, кг/кг;

x_3 – влажность горячего воздуха на выходе из камеры, кг/кг;

$L_{в}$ – массовый расход воздуха, кг/с.

– уравнение для определения средней влажности в слое казеина [64, 65]:

$$w_{cp}(\tau) = \frac{\Gamma+1}{R^{\Gamma+1}} \times \int_0^R r^\Gamma \times w(r, \tau) dr; \quad (108)$$

– начальные и граничные условия:

$$w(r, 0) = w_{cp}(0) = w_0; \quad (109)$$

$$x_2(0) = x_{2,0}; \quad (110)$$

$$\frac{\partial w(0, \tau)}{\partial r} = 0, w(0, \tau) \neq \infty \quad (112)$$

$$k \times \rho_{c.п} \times \frac{\partial w(R, \tau)}{\partial r} = \beta \times \rho_s \times [x_2(\tau) - x_{п.нас}(R, \tau)]; \quad (113)$$

где β – коэффициент массоотдачи в слое казеина ($M \times c^{-1}$).

Введем следующие новые переменные и безразмерные величины [74, 72, 70, 64, 65]:

$$N(\zeta, Fo_m) = \frac{w(r, \tau) - w_{кр}}{w_{кр}}; N_{cp}(Fo_m) = \frac{w_{cp}(\tau) - w_{кр}}{w_{кр}}; Y(Fo_m) = \frac{x_2(\tau) - x_1}{x_1}; N_{cp.0} = \frac{w_{cp.0} - w_p}{w_p};$$

$$Y_0 = \frac{x_0 - x_1}{x_1}; Y_{п.нас} = \frac{x_{п.нас} - x_1}{x_1}; \zeta = \frac{r}{R}; Bi_m = \frac{\beta \times R}{k}; Fo_m = \frac{k \times \tau}{R^2}. \quad (114)$$

$$\text{Обозначим } \sigma_m = \frac{G_{c.п} \times w_{кр}}{G_B \times x_1}; \delta_m = \frac{L_B \times R^2}{G_B \times k};$$

где Fo_m – критерии Фурье,

Bi_m – критерии Био.

Система уравнений (106) – (113) к безразмерному виду [74, 72, 70]:

$$\frac{\partial N(\zeta, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial N(\zeta, Fo_m)}{\partial \zeta^2} + \frac{\Gamma}{\zeta} \times \frac{\partial N(\zeta, Fo_m)}{\partial \zeta}; Fo_m > 0; 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (115)$$

$$\frac{dY(Fo_m)}{dFo_m} + \sigma_m \times \frac{dN_{cp}(Fo_m)}{dFo_m} = -\delta_m \times Y(Fo_m); \quad (116)$$

$$N_{cp}(Fo_m) = (\Gamma + 1) \times \int_0^1 \zeta^\Gamma \times N(\zeta, Fo_m) d\zeta; \quad (117)$$

$$N(\zeta, 0) = N_{cp}(0) = N_{cp.0}; \quad (118)$$

$$Y(0) = Y_0. \quad (119)$$

$$\frac{\partial N(0, Fo_m)}{d\zeta} = 0; \quad N(0, Fo_m) \neq \infty \quad (120)$$

$$\frac{\partial N(1, Fo_m)}{d\zeta} = Bi_m \times [Y(Fo_m) - Y_{п.нас}(1, Fo_m)]; \quad (121)$$

Краевая задача (114) - (121) решается с помощью метода интегральных преобразований Лапласа [74, 72, 70].

Для уравнения (115) запишем операторное уравнение:

$$\frac{d^2 N_L(\zeta, s)}{d\zeta^2} + \frac{\Gamma}{\zeta} \times \frac{dN_L(\zeta, s)}{d\zeta} - sN_L(\zeta, s) + N_{cp.0} = 0, \quad (122)$$

где s – комплексный параметр.

Общие решения операторного уравнения для казеина в форме неограниченной пластины имеет следующий вид [74, 72]:

$$N_L[\zeta, s] - \left(\frac{N_{cp.0}}{s} \right) = A \times ch\sqrt{s} \times \zeta. \quad (123)$$

Запишем среднее значение функции $N_L[\zeta, s]$:

$$N_{cp.L}(s) - \left(\frac{N_{cp.0}}{s} \right) = A \times \frac{ch\sqrt{s}}{\sqrt{s}}. \quad (124)$$

где A – постоянные, не зависящие от ξ и определяемые из граничного условия;

$N_{cp.L}(s)$ – среднее значение функции;

ξ – коэффициент местных сопротивлений.

Уравнений (115) и (121) запишем в области изображений [72, 73]:

$$[sY_L(s) - Y_0] + \left\{ \sigma \times [s(N_{cp.L}(s)) - N_{cp.0}] \right\} = -\delta \times Y_L(s); \quad (125)$$

$$\frac{\partial N_L(1, s)}{\partial \zeta} = Bi_m \times [Y_L(s) - Y_{п.нас}(1, s)], \quad (126)$$

Величину функции $Y_L(s)$ выразим из уравнения (125) и подставим в уравнение (126):

$$\frac{\partial N_L(1, s)}{\partial \zeta} = Bi_m \times \left[\left(\frac{Y_0}{s+Y} \right) - \left(\frac{\sigma}{s+Y} \right) \right] \times [sN_{cp.L}(s) - N_{cp.0}] - Y_{п.нас}(1, s). \quad (127)$$

Решение (123) и среднее значение функции $N_L[\zeta, s]$ (124) удовлетворим условию (127). Постоянный A находим и затем получим решения задачи в области изображений [73]:

$$N_L[\zeta, s] - \frac{N_{cp.0}}{s} = \frac{Bi_m \times [sY_0 - (s + \delta_m)Y_{п.нас}] \times ch(\sqrt{s}\zeta)}{s[Bi_m \times \sigma_m + s + \delta_m] \times \sqrt{s}sh\sqrt{s} + Bi_m \times (s + \delta_m)sh\sqrt{s}}. \quad (128)$$

Числитель и знаменатель в решении (128) можно разложить в сходящиеся степенные ряды [73]:

$$Bi_m \times [sY_0 - (s + \delta_m) \times Y_{п.нас}] \times ch(\sqrt{s}\zeta) = Bi_m \times [sY_0 - (s + \delta_m) \times Y_{п.нас}] \times \left(1 + \frac{s\zeta^2}{2!} + \dots\right), \quad (129)$$

$$\begin{aligned} & s[(Bi_m \times \sigma_m + s + \delta_m)(\sqrt{s}sh\sqrt{s}) + Bi_m \times (s + \delta_m)ch\sqrt{s}] = \\ & s(s + \delta_m) \times \left[\left(\frac{Bi_m \sigma_m}{s + \delta_m} + 1 \right) \sqrt{s} \left(\sqrt{s} + \frac{s\sqrt{s}}{3!} + \dots \right) + Bi_m \times \left(1 + \frac{s}{2!} + \dots \right) \right]. \end{aligned} \quad (130)$$

Знаменатель решений (127) можно приравнять к нулю, затем находим корни уравнений [73]:

- 1) $s = 0$ (нулевой корень),
- 2) $s = -\delta$,
- 3) $s_n = -\mu_n^2$

где $i\sqrt{s} = \mu$ – бесчисленное множество корней.

Теорему разложения можно применить для обратного преобразования Лапласа [74, 72, 73]:

$$L^{-1} \left[\frac{\Phi(s)}{\Psi(s)} \right] = \frac{\Phi(0)}{\Psi'(0)} + \frac{\Phi(-\gamma)}{\Psi'(-\gamma)} \times e^{-\gamma F_0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi(s_n)}{\Psi'(s_n)} \times e^{s_n F_0}. \quad (131)$$

Затем найдем решения задач: распределения влажности в слоях казеина, средней влажности в слоях казеина и влажность горячего воздуха в камере:

– распределения влажности в слоях казеина:

$$\begin{aligned} w(r, \tau) = & w_{kp} + A \times w_{кр} \times \left(\frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) \times \cos \left(\sqrt{\delta_m} \times \frac{r}{R} \right) \times e^{-\delta \times \frac{k\tau}{R^2}} + \\ & + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n \times w_{кр}}{r} \left[\mu_n^2 \times \left(\frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) + (\delta - \mu_n^2) \times \frac{x_{п.нас} - x_1}{x_1} \right] \times \cos \left(\mu_n \times \frac{r}{R} \right) \times e^{-\mu_n^2 \times \frac{k\tau}{R^2}}. \end{aligned} \quad (132)$$

$$\text{где } A = \frac{Bi_m}{Bi_m \times \left(1 + \frac{\sigma_m}{2} \right) \times \cos \sqrt{\delta_m} + \left[\frac{Bi_m \times \sigma_m}{2\sqrt{\delta_m}} - \sqrt{\delta_m} \right] \times \sin \sqrt{\delta_m}},$$

$$B_n = \frac{2Bi_m}{\left(\left[(1 + Bi_m) \times (\delta_m - \mu_n^2) - 2 \times \mu_n^2 + Bi_m \times \sigma_m \right] \times \left[\sin \mu_n + \mu_n \times \left[\delta_m - \mu_n^2 + Bi_m \times (\sigma_m + 2) \times \cos \mu_n \right] \right] \right)},$$

μ_n – корни характеристического уравнения

Уравнение (132) позволяет рассчитать распределения влажности в слоях казеина в любой момент времени первого периода сушки. Решение (132) подставим в уравнение (108) и после интегрирования получим уравнение для расчета средней влажности в слоях казеина в любой момент времени первого периода сушки:

$$w(r, \tau) = w_{kp} + \frac{A}{\sqrt{\delta_m}} \times w_{kp} \times \left(\frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) \times \sin(\sqrt{\delta_m}) e^{-\delta \times \frac{k \times \tau}{R^2}} + \\ + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n \times w_{kp}}{\mu_n^2} \left[\mu_n^2 \times \left(\frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) + (\delta - \mu_n^2) \times \frac{x_{п.нас} - x_1}{x_1} \right] \sin(\mu_n) e^{-\mu_n^2 \times \frac{k \times \tau}{R^2}}. \quad (133)$$

Уравнение для расчета влажности горячего воздуха в камере:

$$x_2(\tau) = x_1 + (x_0 - x_1) \times \left[\frac{A \sqrt{\delta} \times \sigma \times k \times \tau}{R^2} \div (\sin \sqrt{\delta_m}) + 1 \right] e^{-\delta \times \frac{k \times \tau}{R^2}} + \\ + \sigma \times (x_0 - x_1) \times \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{B_n}{\delta_m - \mu_n^2} \times \left[\mu_n^2 + (\delta - \mu_n^2) \times \frac{x_{п.нас} - x_1}{x_0 - x_1} \right] \right) \times (\sin \mu_n) \left(e^{-\mu_n^2 \times \frac{k \times \tau}{R^2}} - e^{-\delta \times \frac{k \times \tau}{R^2}} \right). \quad (134)$$

3.2 Математическое описание переноса влаги в период падающей скорости сушки

Массообмен в период падающей скорости сушки описывается в интервале от первой критической до равновесной влажности в слоях казеина. Влажность казеина и горячего воздуха при выходе из первого периода сушки можно будет принимать как исходные для описания и расчета второго периода. Для математического описания переноса влаги в слоях казеина в период падающей скорости сушки запишем следующие уравнения:

– начальные и граничные условия: распределение влажности в слоях казеина:

$$w(r, 0) = w_{ср.кр} (0) = w_{ср.кр}, \quad (135)$$

Где $w_{ср.кр}$ – критическая влажность в слоях казеина.

– уравнение граничного условия третьего рода уравнение имеет вид [74, 72, 73]:

$$k \times \rho_{c.п} \times \frac{\partial w(R, \tau)}{\partial r} = \beta \times \rho_{\epsilon} \times [x_2(\tau) - x_n(R, \tau)]; \quad (136)$$

где β – коэффициент массоотдачи в слоях казеина ($M \times c^{-1}$).

– уравнение описания равновесия между казеином и горячим воздухом:

$$w_p = E \times x_2. \quad (137)$$

Введем следующие новые переменные и безразмерные величины [74, 72, 70, 64, 65]:

$$\begin{aligned} N(\zeta, Fo_m) &= \frac{w(r, \tau) - w_p}{w_p}; N_{cp}(Fo_m) = \frac{w_{cp}(\tau) - w_p}{w_p}; N_{cp.0} = \frac{w_{cp.0} - w_p}{w_p}; N_{cp.кр} = \frac{w_{cp.кр} - w_p}{w_p}; \\ Y(Fo_m) &= \frac{x_2(\tau) - x_1}{x_1}; Y_0 = \frac{x_0 - x_1}{x_1}; \zeta = \frac{r}{R}; Bi_m = \frac{\beta \times R}{k}; Fo_m = \frac{k \times \tau}{R^2}. \end{aligned} \quad (138)$$

$$\text{Обозначим } \sigma_m = \frac{G_{c.п}}{G_B \times E}; \delta_m = \frac{L_B \times R^2}{G_B \times k};$$

где E – константа Генри;

x_0 – влажность горячего воздуха на выходе из первого периода сушки.

Система уравнений (106), (113)– (135), (137) в безразмерном виде: [74, 72, 70]:

$$\frac{\partial N(\zeta, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial N(\zeta, Fo_m)}{\partial \zeta^2} + \frac{\Gamma}{\zeta} \times \frac{\partial N(\zeta, Fo_m)}{\partial \zeta}; Fo_m \geq 0; \quad 0 \leq \zeta \leq 1, \quad (139)$$

$$\frac{dY(Fo_m)}{dFo_m} + \sigma \times \frac{dN_{cp}(Fo_m)}{dFo_m} = -\delta \times Y(Fo_m); \quad (140)$$

$$N_{cp}(Fo_m) = (\Gamma + 1) \times \int_0^1 \zeta^\Gamma \times N(\zeta, Fo_m) d\zeta; \quad (141)$$

$$N(\zeta, 0) = N_{cp.кр}(0) = N_{cp.кр}; \quad (142)$$

$$Y(0) = Y_0. \quad (143)$$

$$\frac{\partial N(0, Fo_m)}{\partial \zeta} = 0; \quad N(0, Fo_m) \neq \infty \quad (144)$$

$$\frac{\partial N(1, Fo_m)}{\partial \zeta} = Bi_m \times [Y(Fo_m) - N(1, Fo_m)]. \quad (145)$$

Краевая задача (139) - (145) решается с помощью метода интегральных преобразований Лапласа [74, 72, 73, 70]. Для уравнения (139) запишем операторное уравнение:

$$\frac{d^2 N_L(\zeta, s)}{d\zeta^2} + \frac{\Gamma}{\zeta} \times \frac{dN_L(\zeta, s)}{d\zeta} - sN_L(\zeta, s) + N_{cp.kp} = 0, \quad (146)$$

где s – комплексный параметр.

Общие решения операторного уравнения для казеина в форме неограниченной пластины имеет следующий вид [74, 72, 73]:

$$N_L \times [\zeta, s] - \left(\frac{N_{cp.kp}}{s} \right) = A \times ch\sqrt{s}\zeta. \quad (147)$$

Запишем среднее значение функции $N_L[\zeta, s]$:

$$N_{cp.L}(s) - \left(\frac{N_{cp.kp}}{s} \right) = A \times \frac{ch\sqrt{s}}{\sqrt{s}}. \quad (148)$$

где A – постоянные, не зависящие от ξ и определяемые из граничного условия;

$N_{cp.L}(s)$ – среднее значение функции;

ξ – коэффициент местных сопротивлений.

Уравнения (140) и (145) запишем в области изображений [72, 73, 74]:

$$[sY_L(s) - Y_0] + \{\sigma_m \times [s(N_{cp.L}(s)) - N_{cp.kp}]\} = -\delta_m \times Y_L(s); \quad (149)$$

$$\frac{\partial N_L(1, s)}{\partial \zeta} = Bi_m \times [Y_L(s) - N_L(1, s)] \quad (150)$$

Величину функции $Y_L(s)$ выразим из уравнения (149) и подставим в уравнения (150):

$$\frac{\partial N_L(1, s)}{\partial \zeta} = Bi_m \times \left[\left(\frac{Y_0}{s+Y} \right) - \left(\frac{\sigma}{s+Y} \right) \right] \times [sN_{cp.L}(s) - N_{cp.kp}] - N_L(1, s). \quad (151)$$

Решение (147) и среднее значение функции $N_L[\zeta, s]$ (148) удовлетворим условию (151) [74, 72, 75, 73]:

$$N_L[\zeta, s] - \frac{N_{cp.kp}}{s} = \frac{Bi_m \times [sY_0 - (s + \delta_m) \times N_{cp.kp}] \times ch(\sqrt{s}\zeta)}{s[Bi_m \sigma_m + s + \delta_m] \times \sqrt{s} \times sh\sqrt{s} + Bi_m \times (s + \delta_m) \times sh\sqrt{s}}. \quad (152)$$

Решение (152) представляет собой отношение двух обобщенных полиномов относительно s . Числитель и знаменатель в решении (152) можно разложить в сходящиеся степенные ряды [79]:

$$Bi_m \times [sY_0 - (s + \delta_m) \times N_{cp.kp}] ch(\sqrt{s} \times \zeta) =$$

$$Bi_m \times [sY_0 - (s + \delta_m) \times N_{cp.kp}] \times \left(1 + \frac{s\zeta^2}{2!} + \dots \right), \quad (153)$$

$$s[(Bi_m \times \sigma_m + s + \delta_m) \times (\sqrt{s} \times sh\sqrt{s}) + Bi_m \times (s + \delta_m) \times ch\sqrt{s}] =$$

$$s(s + \delta_m) \times \left[\left(\frac{Bi_m \times \sigma_m}{s + \delta_m} + 1 \right) \times \sqrt{s} \times \left(\sqrt{s} + \frac{s\sqrt{s}}{3!} + \dots \right) + Bi_m \times \left(1 + \frac{s}{2!} + \dots \right) \right]. \quad (154)$$

Знаменатель решений (152) можно приравнять к нулю, затем находим корни уравнений:

- 1) $s = 0$ (нулевой корень),
- 2) $s = -\delta$,
- 3) $s_n = -\mu_n^2$

где $i\sqrt{s} = \mu$ – бесчисленное множество корней.

Теорему разложения можно применить для обратного преобразования Лапласа [74, 72, 73]:

$$L^{-1} \left[\frac{\Phi(s)}{\Psi(s)} \right] = \frac{\Phi(0)}{\Psi'(0)} + \frac{\Phi(-\gamma)}{\Psi'(-\gamma)} e^{-\gamma F_{0m}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi(s_n)}{\Psi'(s_n)} e^{s_n F_{0m}}. \quad (155)$$

Затем найдем решения задачи распределения влажности в слоях казеина, средней влажности в слоях казеина и влажность горячего воздуха в камере:

– распределение влажности в слоях казеина:

$$w(r, \tau) = w_p + A \times w_{kp} \times \left(\frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) \times \cos \left(\sqrt{\delta_m} \times \frac{r}{R} \right) e^{-\delta_m \frac{k \times \tau}{R^2}} +$$

$$+ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n \times w_p}{r} \left[\mu_n^2 \times \left(\frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) + (\delta - \mu_n^2) \frac{x_{cp.kp} - x_1}{x_1} \right] \times \cos \left(\mu_n \times \frac{r}{R} \right) e^{-\mu_n^2 \times \frac{k \times \tau}{R^2}}. \quad (156)$$

где $A = \frac{Bi_m}{Bi_m \times \left(1 + \frac{\sigma_m}{2} \right) \times \cos \sqrt{\delta_m} + \left[\frac{Bi_m \times \sigma_m}{2\sqrt{\delta_m}} - \sqrt{\delta_m} \right] \times \sin \sqrt{\delta_m}},$

$$B_n = \frac{2Bi_m}{\left(\left[(1 + Bi_m) \times (\delta_m - \mu_n^2) - 2\mu_n^2 + Bi_m \times \sigma_m \right] \times \left[\sin \mu_n + \mu_n \times \left[\delta_m - \mu_n^2 + Bi_m \times (\sigma_m + 2) \times \cos \mu_n \right] \right] \right)},$$

μ_n – корни характеристического уравнения

Уравнение (156) позволяет рассчитать распределение влажности в слоях казеина в любой момент времени второго периода сушки (период падающей скорости сушки).

– решение (156) подставим в уравнение (141) и после интегрирования получим уравнение для расчета средней влажности в слоях казеина в любой момент времени второго периода сушки:

$$w(r, \tau) = w_p + \frac{A}{\sqrt{\delta_m}} \times w_p \times \left(\frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) \times \sin(\sqrt{\delta_m}) e^{-\delta \times \frac{k \times \tau}{R^2}} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n \times w_p}{\mu_n^2} \left[\mu_n^2 \times \left(\frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) + (\delta - \mu_n^2) \times \frac{x_{co.кр} - x_1}{x_1} \right] \times \sin(\mu_n) e^{-\mu_n^2 \times \frac{k \times \tau}{R^2}}. \quad (157)$$

– уравнение для расчета влажности горячего воздуха в камере:

$$x_2(\tau) = x_1 + (x_0 - x_1) \times \left[\frac{A \times \sqrt{\delta} \times \sigma \times k \times \tau}{R^2} \times (\sin \sqrt{\delta_m}) + 1 \right] e^{-\delta \times \frac{k \times \tau}{R^2}} + \sigma \times (x_0 - x_1) \times \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{B_n}{\delta_m - \mu_n^2} \times \left[\mu_n^2 + (\delta - \mu_n^2) \times \frac{x_{cp.кр} - x_1}{x_0 - x_1} \right] \right) \times (\sin \mu_n) \times \left(e^{-\mu_n^2 \times \frac{k \times \tau}{R^2}} - e^{-\delta \times \frac{k \times \tau}{R^2}} \right) \quad (158)$$

3.3 Математическое описание переноса тепла в слоях казеина в процессе сушки

Для математического описания переноса тепла в слоях казеина в период падающей скорости сушки запишем следующие уравнения:

– уравнение нестационарного переноса тепла в камере [74, 72, 73, 70]:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial(\tau)} = a \times \left[\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial(r^2)} + \frac{\Gamma}{r} \times \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial(r)} \right]; \quad (\tau > 0; 0 \leq r \leq R), \quad (160)$$

где Γ – коэффициент = 0;

r – координата по толщине образцов казеина (м);

R – половина толщины продукта (м);

t – температура в слоях казеина, °С;

τ – время сушки (с);

– уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned}
& (Q_{\text{в.из}} + G_{\text{в}} \times c_{\text{в}}) \times \frac{dt_i(\tau)}{d\tau} + (G_{\text{вл.п}} \times c_{\text{вл.п}} + Q_{\text{вл.п.из}}) \times \frac{dt_{\text{cp}}(\tau)}{d\tau} + \\
& (G_{\text{с.п}} \times \varepsilon \times r^* + Q_{\text{исп}}) \times \frac{dw_{\text{cp}}(\tau)}{d(\tau)} = \\
& = L_{\text{в}} \times c_{\text{в}} \times [t_2 - t_i(\tau)] - K_{\text{ок}} \times S_{\text{ап}} \times [t_i - t_1];
\end{aligned} \tag{161}$$

где $Q_{\text{в.из}}$ – потери теплоты нагреваемым телом (воздуха) окружающего казеина при ИК;

$Q_{\text{вл.п.из}}$ – расход теплоты на нагрев слоев казеина при ИК-излучении;

$Q_{\text{исп}}$ – расход теплоты на испарение влаги с поверхности казеина при ИК-излучении;

$G_{\text{вл.п}}$ – масса влажного продукта, кг;

$G_{\text{с.п}}$ – масса сухого продукта, кг;

w_{cp} – влагосодержание казеина, кг/кг;

x_2 – влагосодержание воздуха в любой точке сушильной камеры, кг/кг;

x_3 – влагосодержание воздуха на выходе из камеры, кг/кг;

$L_{\text{в}}$ – массовый расход воздуха, кг/с;

$c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг×К);

$c_{\text{п}}$ – удельная теплоемкость казеина, Дж/(кг×К);

ε – критерий фазового превращения;

$S_{\text{п}}$ – поверхность продукта (испарения), которая не всегда равна поверхности облучения, м²;

K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²×К);

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

r^* – удельная теплота испарения, Дж/кг.

Температура влажного воздуха перед основным калорифером t_1 , градус. После нагрева температура воздуха повышается до t_2 , градус; температура влажного воздуха на выходе из камеры равна температуре воздуха в любой точке камеры t_i .

– Начальные и граничные условия [74, 72, 73]:

$$t(r,0) = t_{\text{cp}}(0) = t_{\text{cp},0}; \tag{162}$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{t(r)} = 0; \quad (163)$$

$$\lambda \times \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial(r)} = \alpha \times [t_i(\tau) - t(R, \tau)]; \quad (164)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²×К);

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м×К);

$$t_i(0) = t_{i,0}; \quad (165)$$

$$w_{cp}(0) = w_{cp,кр}. \quad (166)$$

– Уравнение для определения средней температуры в слоях казеина:

$$t_{cp}(\tau) = \frac{\Gamma + 1}{R^{\Gamma+1}} \times \int_0^R r^{\Gamma} \times t(r, \tau) dr; \quad (167)$$

Для неограниченной пластины $\Gamma=0$

В разделе (3.3) было получено решение задачи переноса влаги в слоях казеина в период падающей скорости сушки (уравнение 128)

Используем уравнение связи между $w_{cp}(\tau)$ и $w(R, r)$ [71]:

$$V_{c.п} \times \frac{dw_{cp}(\tau)}{d\tau} = n \times S_{c.п} \times k \times \frac{\partial w(R, r)}{\partial(r)}. \quad (168)$$

где $S_{c.п}$ – площадь поверхности казеина, м²;

n – количество слоев казеина.

Уравнение теплового баланса (161) можно записать с учетом уравнения (168) связи между $w_{cp}(\tau)$ и $w(R, r)$ [71]:

$$\begin{aligned} & (Q_{в.из} + G_{в} \times c_{в}) \times \frac{dt_i(\tau)}{d\tau} + (G_{вл.п} \times c_{вл.п} + Q_{вл.п.из}) \times \frac{dt_{cp}(\tau)}{d\tau} + \\ & (n \times S_{ан} \times \rho_{с.п} + Q_{исп}) \times \frac{dw_{cp}(\tau)}{d(\tau)} = \\ & = L_{в} \times c_{в} \times [t_2 - t_i(\tau)] - K_{ок} \times S_{ан} \times [t_i - t_1]; \end{aligned} \quad (169)$$

Ограничимся первым слагаемым в решении (156) под знаком суммы, и затем решение (156) подставим в уравнение теплового баланса (169). Введем следующие новые переменные и безразмерные величины [71, 74, 72]:

$$\begin{aligned}
T(\zeta, Fo_t) &= \left(\frac{t_2 - t(r, \tau)}{t_2} \right); T_i(Fo_t) = \left(\frac{t_2 - t_i(\tau)}{t_2} \right); T_{cp}(Fo_t) = \left(\frac{t_2 - t_{cp}(\tau)}{t_2} \right); T_{cp,0} = \frac{t_2 - t_{cp,0}}{t_2}; T_{2,0} = \frac{t_2 - t_0}{t_2}; \\
T_{o.c} &= \frac{t_2 - t_{o.c}}{t_2}; W(\zeta, Fo_t) = \frac{w(r, \tau)}{w_p}; Bi_t = \frac{\alpha \times R}{\lambda}; Fo_t = \frac{\alpha \times \tau}{(R)^2}; \zeta = \frac{r}{R}; \delta_t = \frac{R^2 \times L_B \times c_\epsilon + K_{ок} \times S_{ап}}{G_B \times c_\epsilon \times a} \\
\sigma_t &= \frac{G_{вл.п} \times c_{вл.п} + Q_{вл.из}}{G_B \times c_\epsilon + Q_{вл.из}}; \eta_t = \frac{k_{ок} \times S_{ап} \times R^2}{(G_B \times c_\epsilon + Q_{вл.из}) \times a}; \gamma = \mu_1^2 \times \frac{k}{a}.
\end{aligned} \tag{170}$$

Система уравнений (160) – (164), (167) в безразмерном виде [74, 72, 70]:

$$\frac{\partial T(\zeta, Fo_t)}{\partial Fo_t} = a \times \left[\frac{\partial^2 T(\zeta, Fo_t)}{\partial (\zeta^2)} + \frac{\Gamma}{\zeta} \times \frac{\partial T(\zeta, Fo_t)}{\partial \zeta} \right]; \tag{171}$$

$$\frac{dT_i(Fo_t)}{dFo_t} + \sigma_t \times \frac{dT_i(Fo_t)}{dFo_t} + D e^{-\gamma \times Fo_t} = -\delta_t \times T_i(Fo_t) + \eta_t \times T_{o.c}, \tag{172}$$

где

$$\begin{aligned}
D &= \frac{(Q_{исп} + n \times S_{п} \times k \times \rho_{c.n} \times \varepsilon) r \times R \times w_p}{(G_B \times c_\epsilon + Q_{вл.из}) \times a \times t_2} \times B_n \times \left[\mu_1^2 \times \left(\frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) + (\delta - \mu_1^2) \times \frac{w_{cp,кр} - w_p}{w_p} \right] \times \\
&(\sin \mu_1 - \mu_1 \times \cos \mu_1)
\end{aligned}$$

$$T(\zeta, 0) = T_{cp}(0) = T_{cp,o}; \tag{173}$$

$$\frac{\partial T(0, Fo_t)}{\partial \zeta} = 0; \tag{174}$$

$$\frac{\partial T(1, Fo_t)}{\partial \zeta} = Bi_t \times [T_i(Fo_t) - T(1, Fo_t)]; \tag{175}$$

$$T_i(0) = T_{i,0}; \tag{176}$$

$$T_{cp}(\zeta) = \frac{\Gamma + 1}{\zeta^{\Gamma+1}} \times \int_0^1 \zeta^\Gamma \times t(\zeta, Fo_t) d\zeta; \tag{177}$$

Краевая задача (171) - (177) решается с помощью метода интегральных преобразований Лапласа [74, 72, 75, 70]. Для уравнения (171) запишем операторное уравнение [74, 71]:

$$\frac{d^2 T_L(\zeta, s)}{d\zeta^2} + \frac{\Gamma}{\zeta} \times \frac{dT_L(\zeta, s)}{d\zeta} - s T_L(\zeta, s) + T_{cp,0} = 0, \tag{178}$$

где s – комплексный параметр.

Общие решения уравнения имеют следующий вид [71]:

Для неограниченной пластины

$$T_L[\zeta, s] - \left(\frac{T_{cp,0}}{s} \right) = A \times ch\sqrt{s}\zeta. \quad (179)$$

Запишем среднее значение функции $T_L[\zeta, s]$:

$$T_{cp,L}(s) - \left(\frac{T_{cp,0}}{s} \right) = A \times \frac{ch\sqrt{s}}{\sqrt{s}}. \quad (180)$$

Уравнения (172) и (175) запишем [72,73]:

$$sT_{iL}(s) - T_{i,0} + \sigma_i \times [sT_{cpL}(s) - T_{cp,0}] + \frac{D}{s + \gamma} = -\delta_i \times T_{iL}(s) + \frac{\eta_t}{s} \times T_{o.c}, \quad (181)$$

$$\frac{\partial T_L(1, s)}{\partial \zeta} = Bi_t \times [T_{iL}(s) - T_L(1, s)] \quad (182)$$

Величину функции $Y_L(s)$ выразим из уравнения (181) и подставим в уравнения (182):

$$\frac{\partial T_L(1, s)}{\partial \zeta} = Bi_t \times \left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{i,0}}{s + \delta_i} - \frac{\sigma_i}{s + \delta_i} \times [sT_{cp}(s) - T_{cp,0}] - \\ - \frac{D}{(s + \gamma) \times (s + \delta_i)} + \frac{\eta_t}{s(s + \delta_i)} \times T_{o.c} - T_L(1, s) \end{array} \right\}. \quad (183)$$

Удовлетворим решения (179) – (180) условию (151) постоянный A находим и затем получим решения задачи [75]:

$$T_L(\zeta, s) - \frac{T_{cp,0}}{s} = \frac{Bi_t \times \{ [sT_{i,0} + \eta_t \times T_{o.c} - (s + \delta_i) \times T_{cp,0}] \times (s + \gamma) - sD \} \times ch\sqrt{s}\zeta}{s [(s + \delta_i + Bi_t \times \sigma_i) \times (\sqrt{s} \times sh\sqrt{s}) + Bi_t \times (s + \delta_i) \times sh\sqrt{s}]}. \quad (184)$$

Числитель и знаменатель в решении (184) можно разложить в сходящиеся степенные ряды [73]:

$$Bi_t \times \{ [sT_{i,0} + \eta_t \times T_{o.c} - (s + \delta_i) \times T_{cp,0}] \times (s + \gamma) - sD \} \times ch\sqrt{s}\zeta = \\ Bi_t \times \{ [sT_{i,0} + \eta_t \times T_{o.c} - (s + \delta_i) \times T_{cp,0}] \times (s + \gamma) - sD \} \times \left(1 + \frac{1}{2!} s\zeta^2 + \dots \right). \quad (185)$$

$$s [(s + \delta_i + Bi_t \times \sigma_i) (\sqrt{s} \times sh\sqrt{s}) + Bi_t \times (s + \delta_i) \times sh\sqrt{s}] = \\ = s \left\{ (s + \delta_i + Bi_t \times \sigma_i) \left[\left(1 + \frac{1}{2!} s + \frac{1}{4!} s^2 + \dots \right) - \left(1 + \frac{1}{3!} s + \frac{1}{5!} s^2 + \dots \right) \right] + Bi_t \times (s + \delta_i) \left(1 + \frac{1}{3!} s + \frac{1}{5!} s^2 + \dots \right) \right\}. \quad (186)$$

Теорему разложения (уравнение 146) можно применить для обратного преобразования Лапласа [74, 72, 73]. Знаменатель решений (184) можно приравнять к нулю, затем находим корни уравнений:

1) $s = 0$ (нулевой корень),

2) $s = -\gamma$,

3) бесконечное множество корней s_n , определяемых из уравнения:

$$(s + \gamma) \times \left[(s + \delta_i + Bi_i \times \sigma_i) \times (\sqrt{s} \times sh\sqrt{s}) + Bi_i \times (s + \delta_i) \times sh\sqrt{s} = 0 \right] \quad (187)$$

Гиперболические функции выразим из (187) и затем обозначим \mathcal{G} , получается:

$$tg \mathcal{G} = \frac{\mathcal{G}(\delta_i - \mathcal{G}^2 + Bi_i \times \sigma_i)}{Bi_i \times \sigma_i + (\delta_i - \mathcal{G}^2) \times (1 - Bi_i)}. \quad (188)$$

Затем найдем решения задач распределения влажности в слоях казеина, средней влажности в слоях казеина и влажность горячего воздуха в камере. С помощью теоремы разложения решения задачи распределения температуры в слоях казеина, средней температуры в слоях казеина и температуры горячего воздуха в камере.

– Распределение температуры в слоях казеина в любой момент времени периода падающей скорости сушки:

$$t(r, \tau) = t_2 - t_2 \times \frac{\eta_i}{\delta_i} \times \left(\frac{t_2 - t_{o.c.}}{t_2} \right) - t_2 \times B_n \times \cos \left(\sqrt{\gamma_i} \times \frac{r}{R} \right) e^{-\mu_i^2 \times F_{o_m}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t_2 \times Bi_i \times D_n}{\mathcal{G}_n^2} \times \cos \left(\mathcal{G}_n \times \frac{r}{R} \right) e^{-\mathcal{G}_n^2 \times F_{o_i}}. \quad (189)$$

где

$$B_n = \frac{Bi_i \times D}{[\gamma - \delta_i] \times \left[1 - \frac{Bi_i \times \sigma_i}{\gamma - \delta_i} \right] \times \sin \sqrt{\gamma} + \sqrt{\gamma} \times (\delta_i - \gamma) \left[1 + \frac{Bi_i \times \sigma_i}{\delta_i - \gamma} \right] \times \cos \sqrt{\gamma}},$$

$$D_n = \frac{\mathcal{G}_n^2 \times \left(\frac{t_2 - t_0}{t_2} \right) + \eta_i \times \left(\frac{t_2 - t_{o.c.}}{t_2} \right) - (\delta_i - \mathcal{G}_n^2) \times \left(\frac{t_2 - t_{cp.0}}{t_2} \right) + \frac{\mathcal{G}_n^2 \times D}{\gamma - \mathcal{G}_n^2}}{\left[\frac{1}{2} (\delta_i - \mathcal{G}_n^2 + Bi_i \times \sigma_i) - 1 + Bi_i \right] \times \sin \mathcal{G}_n + \left[\mathcal{G}_n - \frac{Bi_i \times (\delta_i - \mathcal{G}_n^2)}{2\mathcal{G}_n} \right] \cos \mathcal{G}_n},$$

μ_n – корни характеристического уравнения

Решение (189) подставим в уравнении (167), и после интегрирования получим уравнение для расчета средней температуры в слоях казеина в любой момент времени периода падающей скорости сушки:

$$\begin{aligned}
t(r, \tau) = & t_2 - t_2 \times \frac{\eta_t}{\delta_t} \times \left(\frac{t_2 - t_{o.c}}{t_2} \right) - t_2 \frac{B_n}{\sqrt{\gamma}} \times \sin(\sqrt{\gamma} r) e^{-\mu_t^2 \times F_{o.m}} \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t_2 \times \text{Bi}_t \times D_n}{g_n^2} \times \cos\left(g_n \frac{r}{R}\right) e^{-g_n^2 \times F_{o.t}}.
\end{aligned} \tag{190}$$

По аналогии с решением уравнения (157) найдем уравнение для расчета температуры горячего воздуха в камере:

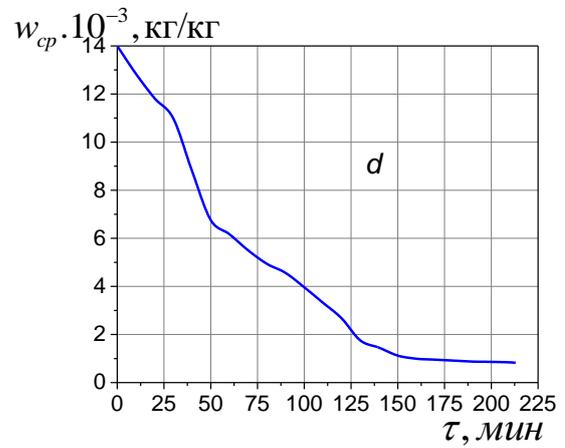
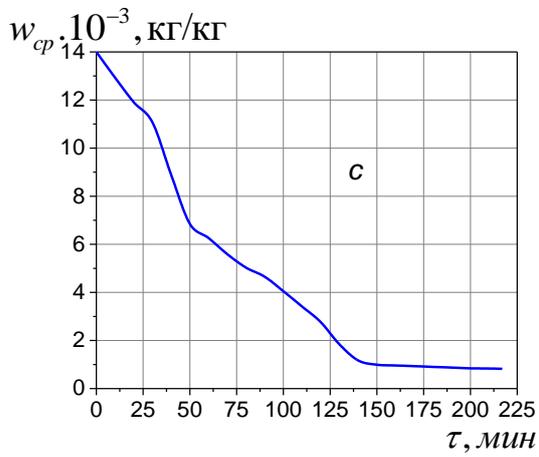
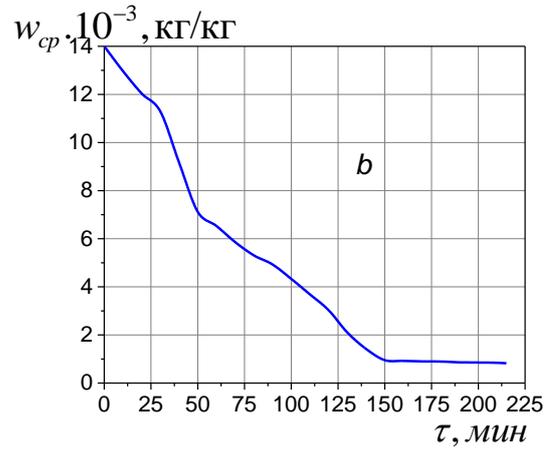
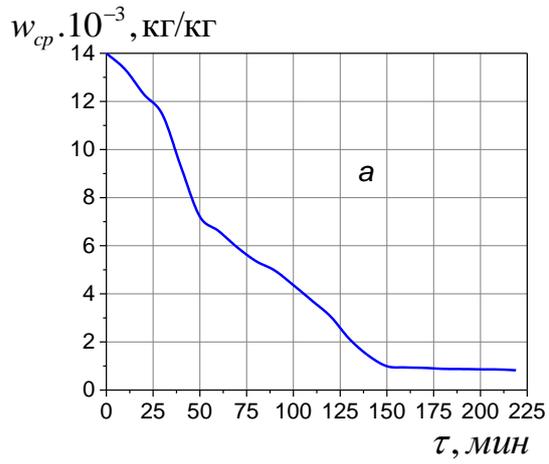
$$\begin{aligned}
\frac{t_2 - t_i(\tau)}{t_2} = & \left[\frac{B_n \times \sqrt{\delta_t} \times \sigma_t \times k \times \tau}{R^2} \times (\sin \sqrt{\delta_t} r) + 1 \right] e^{-\mu_t^2 \times F_{o.m}} + \\
& + \sigma_t \times \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{D_n}{\delta_t - g_n^2} \times \left[\mu_n^2 + (\delta_t - g_n^2) \times \frac{t_2 - t_{cp.0}}{t_2} \right] \right) \times (\sin g_n r) \left(e^{-\mu_n^2 \times F_{o.m}} - e^{-\mu_t^2 \times F_{o.t}} \right)
\end{aligned} \tag{191}$$

3.4 Проверка адекватности математических моделей

3.4.1 Экспериментальные исследования процесса сушки и обсуждение полученных результатов

Для проверки адекватности полученных математических моделей, разработанных в разделах (3.1, 3.2 и 3.3), экспериментально исследовали процесс сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве (рис. 15).

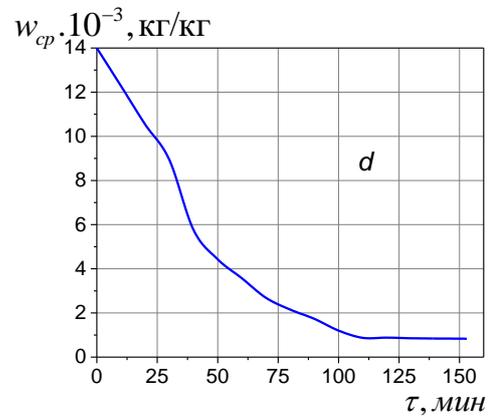
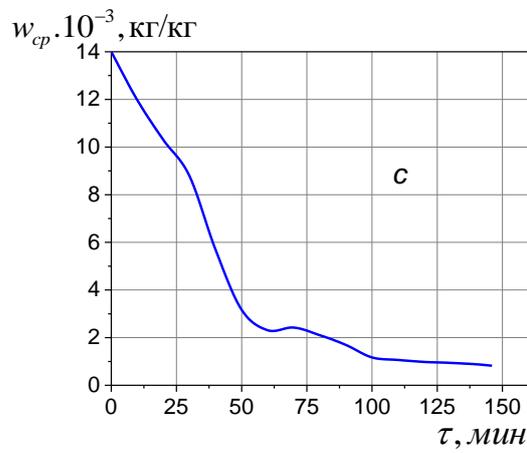
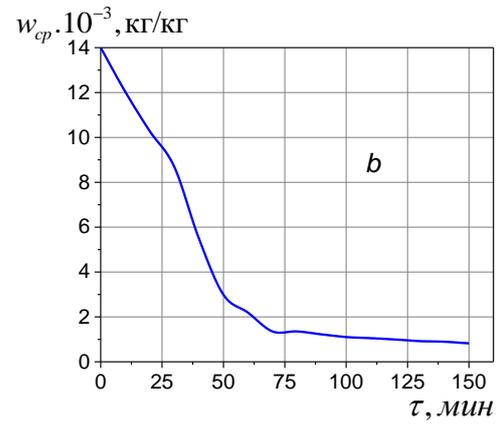
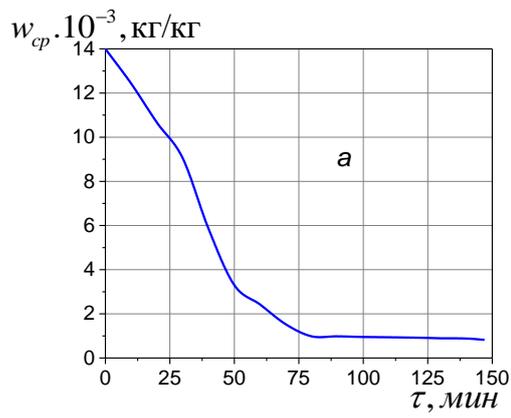
Результаты исследований сушки казеина в форме пластины приведены на рисунках 33, 34, 35 и 36.



Режимы сушки: $a-t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 10\text{ см}$, $2R=0,4\text{ см}$, $q_{uz}=2,02\text{ кВт/м}^2$; $b-t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 12\text{ см}$, $2R=0,4\text{ см}$, $q_{uz}=3,42\text{ кВт/м}^2$; $c-t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$, $2R=1\text{ см}$, $q_{uz}=2,88\text{ кВт/м}^2$; $d-t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 20\text{ см}$, $2R=0,8\text{ см}$, $q_{uz}=3,42\text{ кВт/м}^2$

Рисунок 33 – Кривые сушки казеина

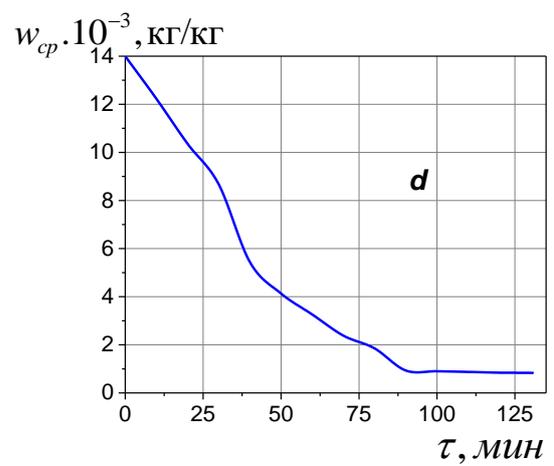
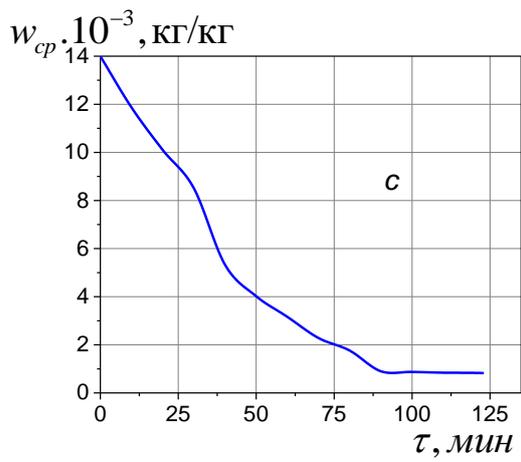
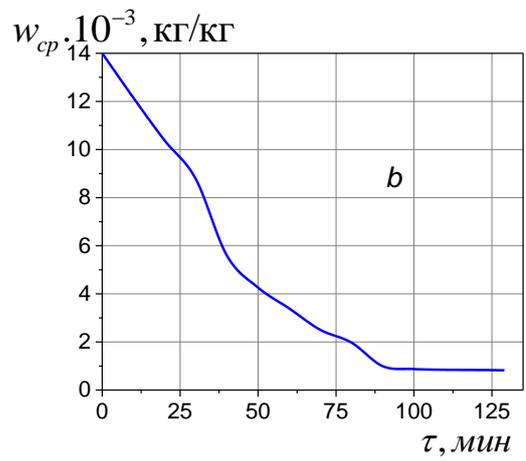
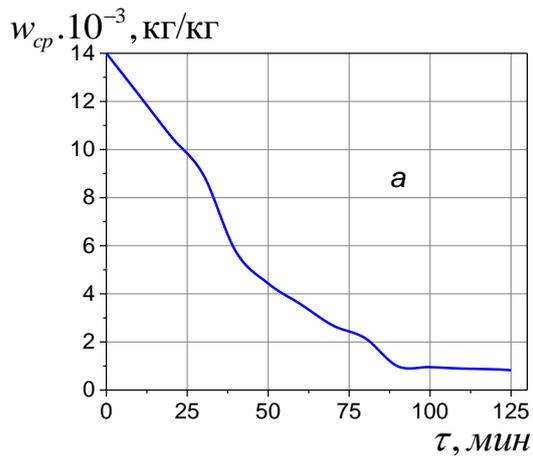
Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



Режимы сушки: $a-t_3=140^\circ C$, $h = 10$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²; $b-t_3=140^\circ C$, $h = 12$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м²; $c-t_3=140^\circ C$, $h = 15$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; $d-t_3=140^\circ C$, $h = 20$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²

Рисунок 34 – Кривые сушки казеина

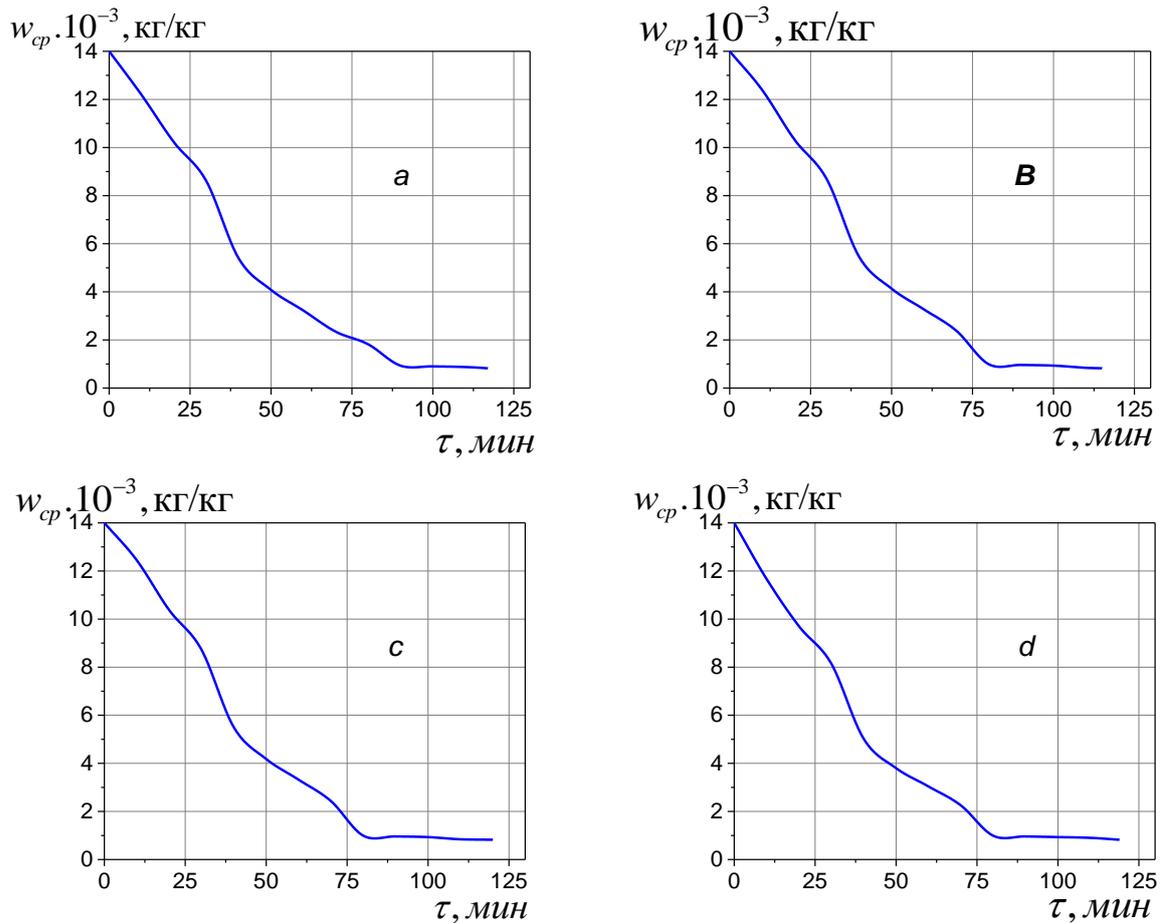
Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



Режимы сушки *a*– $t_3 = 160^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R = 0,8$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м²; *b*– $t_3 = 160^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R = 1,2$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м²; *c*– $t_3 = 160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R = 0,4$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м²; *d*– $t_3 = 160^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R = 1,2$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м²

Рисунок 35 – Кривые сушки казеина

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



Режимы сушки: *a*– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м²; *b*– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²; *c*– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,9$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²; *d*– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²

Рисунок 36 – Кривые сушки казеина

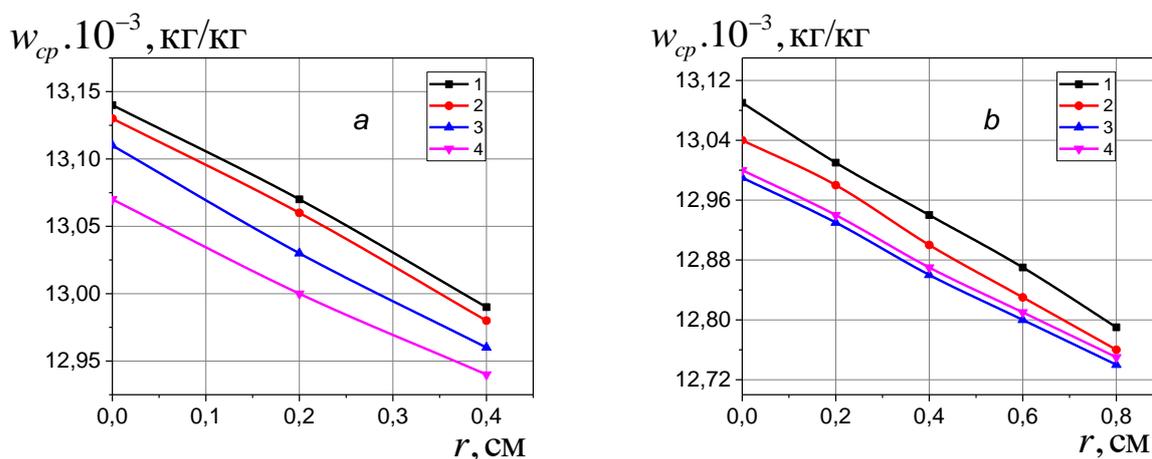
Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Из кинетических кривых (рисунки 33, 34, 35 и 36) видно, что диаметр частиц образцов казеина (R), расстояние от поверхности казеина до источника ИК-излучения (h), плотность теплового потока ИК (q_{uz}) и температура горячего воздуха в камере (t_3), оказывают существенное влияние на кинетику сушки. В начале сушки образцы казеина имеют равномерное влагосодержание. При комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве влага казеина начинается интенсивно испаряться с поверхности до равновесного значения (рис. 37-38).

При инфракрасном и конвективном нагреве перепад температур внутри слоев казеина начинается интенсивно повышаться и достигает значение не более

(рис. 41-42). При этом влаги горячего воздуха в камере (в процессе сушки) быстро начинается увеличиваться до максимального значения (рис. 43-44).

При дальнейшем протекании радиационно-конвективной сушки казеина испарение влаги с поверхности замедляется, влажность горячего воздуха в камере постепенно падает и разность температур между слоями и поверхностью казеина уменьшается, и температура воздуха повышается (рис. 45-46)

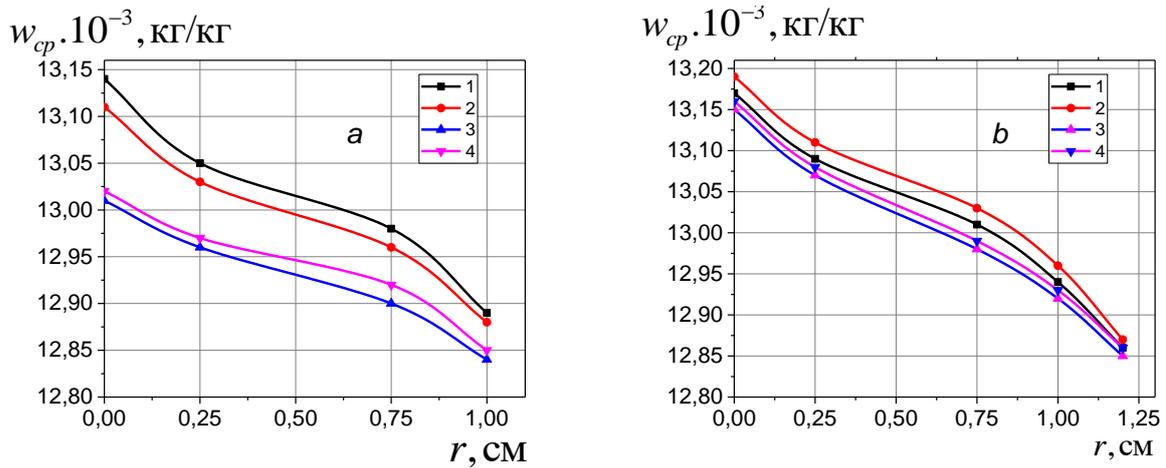


a – толщина образца: 0,4 см: 1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 2– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 3– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 4– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²

b–толщина образца 0,8 см: 1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 2– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 3– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²; 4– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²

Рисунок 37 – Распределение влаги по полутолщине казеина в процессе сушки при разных режимах радиационно-конвективной сушки

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

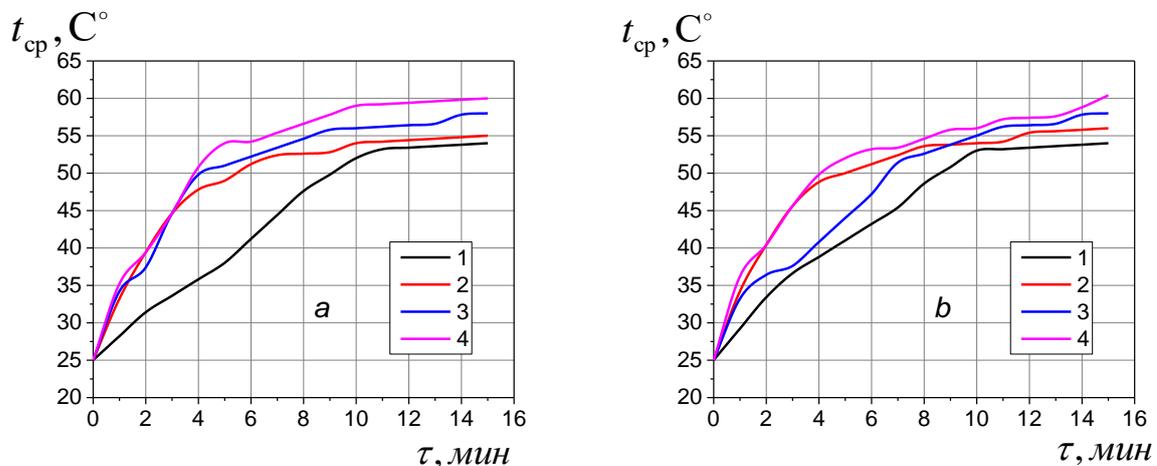


a– Толщина образца 1 см: 1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м²; 2– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м²; 3– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м²; 4– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²

b–Толщина образца 1,2 см: 1– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²; 2– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 3– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 4– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м²

Рисунок 38 – Распределение влаги по полутолщине казеина в процессе сушки при разных режимах инфракрасно-конвективной сушки

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

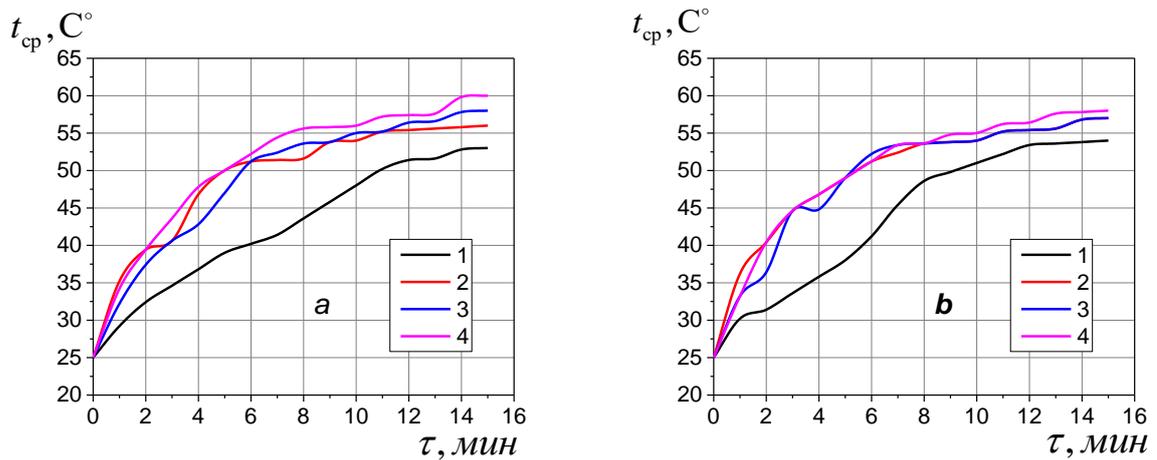


a– 1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 2– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²; 3– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 4– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м².

b– 1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 2– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м²; 3– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 4– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м².

Рисунок 39 – Температурные кривые нагрева частиц казеина при разных режимах радиационно-конвективной сушки

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

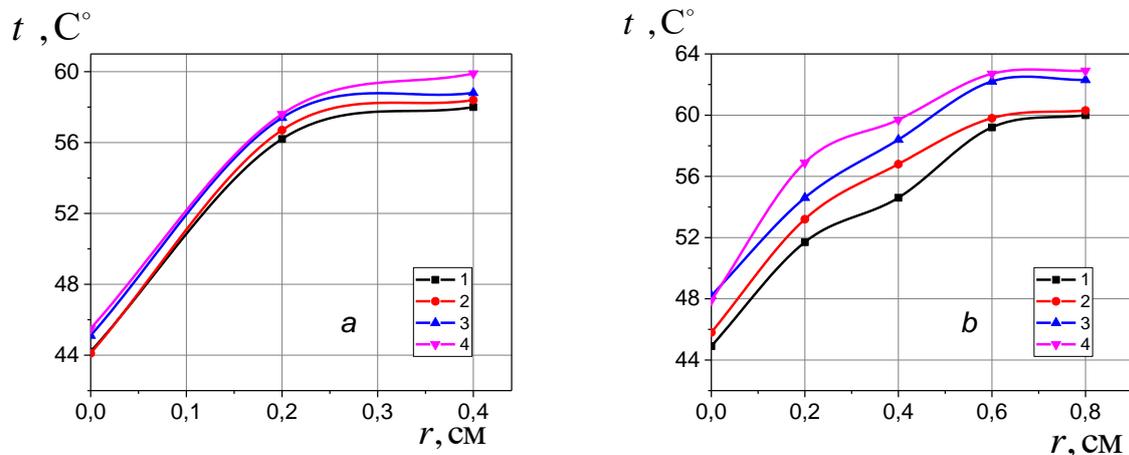


a– $t_3=100^{\circ}\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м²; 2– $t_3=140^{\circ}\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 3– $t_3=160^{\circ}\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 4 – $t_3=180^{\circ}\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²

b–1– $t_3=100^{\circ}\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 2– $t_3=140^{\circ}\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=2,022$ кВт/м²; 3– $t_3=160^{\circ}\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м²; 4– $t_3=180^{\circ}\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²

Рисунок 40 – Температурные кривые нагрева частиц казеина при разных режимах радиационно-конвективной сушки

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

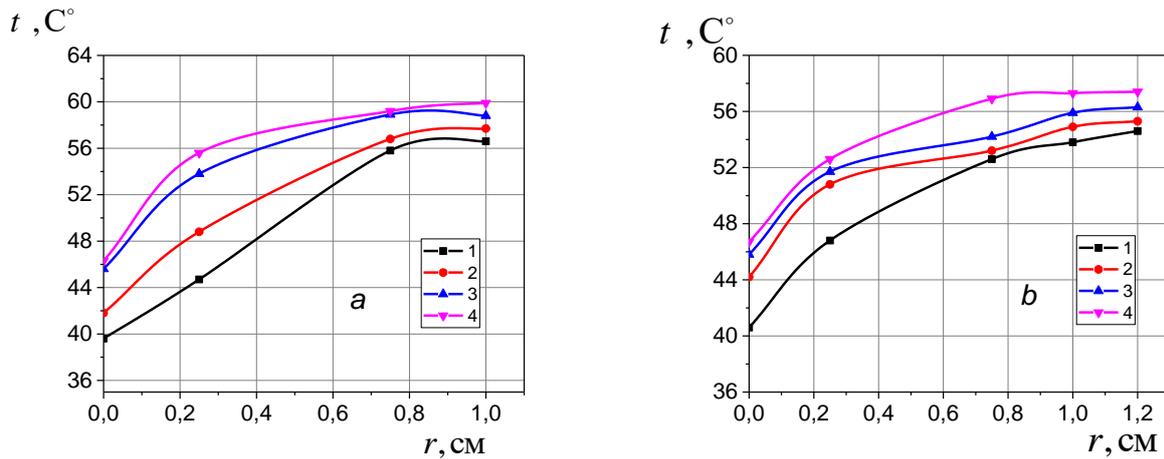


a– Толщина образца: **0,4 см**: 1– $t_3=100^{\circ}\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 2– $t_3=100^{\circ}\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 3– $t_3=140^{\circ}\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 4– $t_3=160^{\circ}\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²

b–Толщина образца **0,8 см**: 1– $t_3=100^{\circ}\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 2– $t_3=160^{\circ}\text{C}$ 2– $h = 10$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 3– $t_3=180^{\circ}\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²; 4– $t_3=180^{\circ}\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²

Рисунок 41 – Распределение температуры по полутолщине образца казеина по времени сушки при разных режимах сушки

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

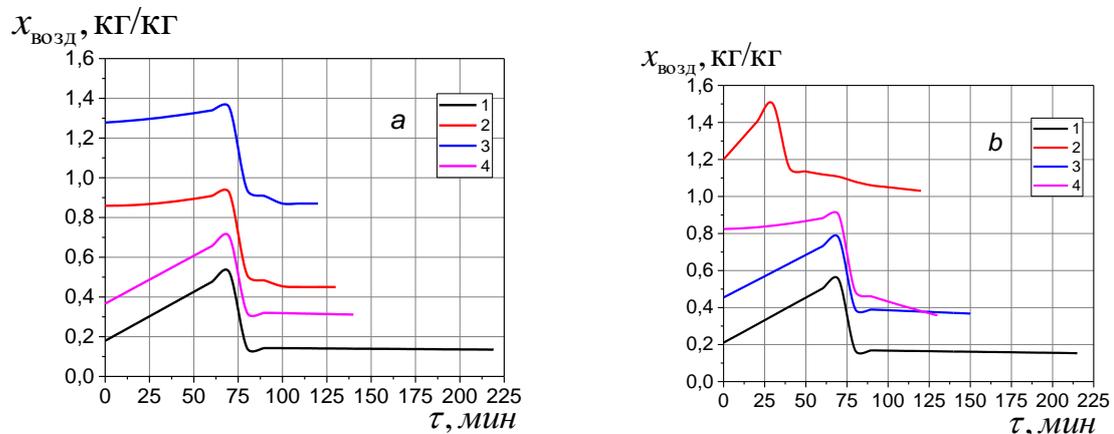


a– Толщина образца 1 см: 1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1$ см, $q_{u3}=2,88$ кВт/м²; 2– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 1$ см, $q_{u3}=2,88$ кВт/м²; 3– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 1$ см, $q_{u3}=2,88$ кВт/м²; 4– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 1$ см, $q_{u3}=3,97$ кВт/м²

b–Толщина образца 1,2 см: 1– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{u3}=3,97$ кВт/м²; 2 – $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{u3}=2,02$ кВт/м²; 3– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{u3}=2,02$ кВт/м²; 4– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{u3}=2,88$ кВт/м²

Рисунок 42– Распределение температуры по полутолщине казеина в процессе сушки при разных режимах радиационно-конвективной сушки

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

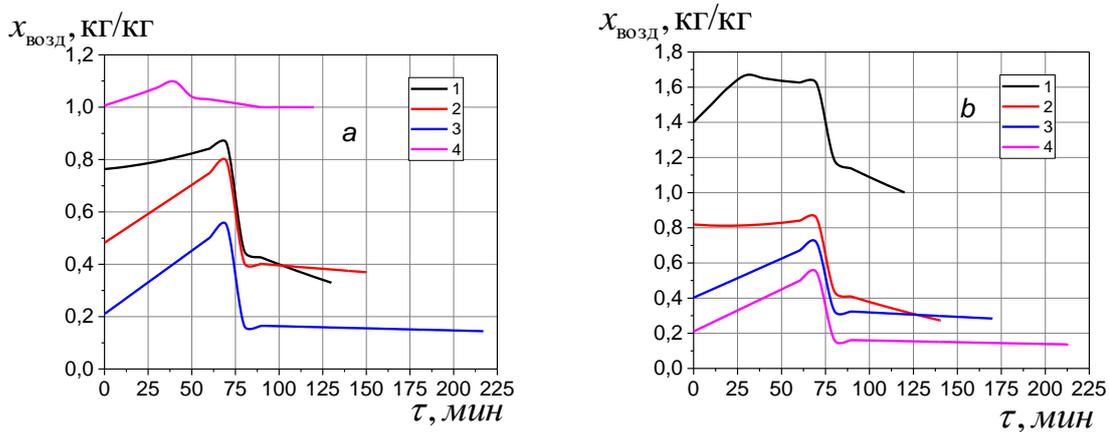


a–1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{u3}=2,02$ кВт/м²; 2– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{u3}=3,97$ кВт/м²; 3– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{u3}=3,42$ кВт/м²; 4– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R= 1$ см, $q_{u3}=2,88$ кВт/м²

b–1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{u3}=3,42$ кВт/м²; 2– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 1$ см, $q_{u3}=2,88$ кВт/м²; 3– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{u3}=2,02$ кВт/м²; 4– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{u3}=3,97$ кВт/м²

Рисунок 43 – Изменение влагосодержания воздуха внутри сушилки с течением времени процесса сушки казеина при режимах а и б

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



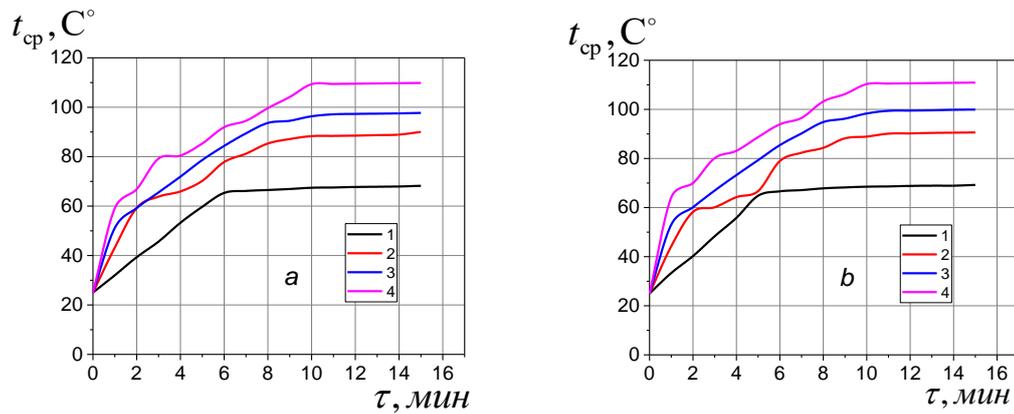
a–1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1$ см, $q_{уз} = 2,88$ кВт/м²; 2– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{уз} = 2,02$ кВт/м²; 3– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{уз} = 3,42$ кВт/м²; 4– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{уз} = 3,97$ кВт/м²

b–1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{уз} = 3,42$ кВт/м²; 2– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{уз} = 2,02$ кВт/м²; 3– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{уз} = 2,88$ кВт/м²; 4– $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R= 1$ см, $q_{уз} = 3,97$ кВт/м²

Рисунок 44 – Изменение влагосодержания воздуха внутри сушилки с течением времени процесса сушки казеина при различных режимах

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

В конце сушки испарение влаги казеина прекращается и становится равной равновесной, температура в слоях казеина достигает температуры на поверхности и влажность горячего воздуха на входе и в камере (при сушке) становятся равными между собой.

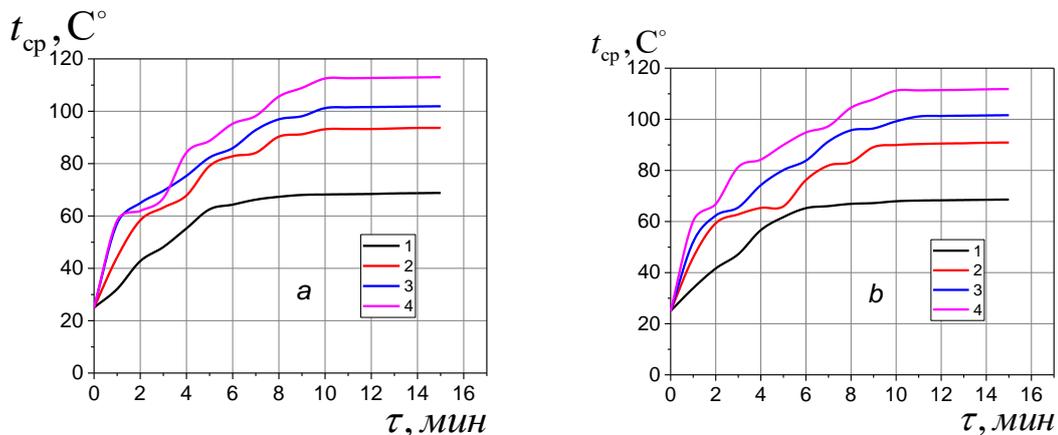


a—1— $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R = 0,4$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м²; 2— $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R = 1,2$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м²; 3— $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R = 0,8$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м²; 4— $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $2R = 1$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м²

b—1— $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R = 0,4$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м²; 2— $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R = 1$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м²; 3— $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R = 1,2$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м²; 4— $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $2R = 0,8$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м²

Рисунок 45 – Изменение температуры горячего воздуха в камере с течением времени радиационно-конвективной сушки при разных режимах

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



a—1— $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R = 1$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м²; 2— $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R = 1,2$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м²; 3— $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R = 0,4$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м²; 4— $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R = 0,8$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м²

b—1— $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R = 0,8$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м²; 2— $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R = 0,4$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м²; 3— $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R = 1,2$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м²; 4— $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $2R = 1$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м²

Рисунок 46 – Изменение температуры горячего воздуха в камере с течением времени радиационно-конвективной сушки при разных режимах

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

3.4.2 Адекватность математических моделей

Для выполнения расчетов сушки казеина и проверки адекватности математических моделей находили равновесные, диффузионные, тепловые и гидродинамические параметры процесса при инфракрасном и конвективном нагреве [20, 21, 56, 52, 54, 55].

Для расчетов были выбраны следующие режимы сушки:

- 1) $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15\text{см}$, $2R= 0,4\text{ см}$, $q_{uz} = 2,02\text{ кВт/м}^2$;
- 2) $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15\text{см}$, $2R= 1,2\text{ см}$, $q_{uz} = 3,97\text{ кВт/м}^2$;
- 3) $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15\text{см}$, $2R= 0,8\text{ см}$, $q_{uz} = 3,42\text{ кВт/м}^2$;
- 4) $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15\text{см}$, $2R= 1\text{ см}$, $q_{uz} = 2,88\text{ кВт/м}^2$.

Константа Генри для системы влажный казеин - горячий воздух

Таблица 21 – Значение константы Генри для системы влажного казеина - горячего воздуха

Режимы сушки	Казеин в форме пластины	
	Средняя температура воздуха в камере	Значение константы Генри
$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$, $2R= 0,4\text{ см}$, $q_{uz} = 2,02\text{ кВт/м}^2$	72,99	1,585
$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$, $2R= 1,2\text{ см}$, $q_{uz} = 3,97\text{ кВт/м}^2$	88,15	0,305
$t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$, $2R= 0,8\text{ см}$, $q_{uz} = 3,42\text{ кВт/м}^2$	103,47	0,347
$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$, $2R= 1\text{ см}$, $q_{uz} = 2,88\text{ кВт/м}^2$	114,20	0,611

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Коэффициент влагопроводности казеина [53, 54, 21, 21]:

$$k = \frac{k_0}{1 - B \times w_{cp}}. \quad (192)$$

$$B = 0,002 \times \rho_0 \quad (193)$$

$$w_{cp} = \frac{M_{вл.п}}{M_{с.п}} \times 100 \quad (194)$$

$$k_0 = \alpha_b \times d \times \left(\frac{T}{1000} \right)^n. \quad (195)$$

где k – коэффициент влагопроводности казеина, м²/ч;

$\rho_0 = 1140$ кг/м³ – плотность абсолютно сухого казеина;

w_{cp} – средняя влажность казеина;

a_b , d и n – постоянные; ($a_b = 5,9$, $d = 1$, $n = 10$).

Таблица 22 – Коэффициенты влагопроводности для первого и второго периода сушки казеина в форме неограниченной пластины

Режимы сушки казеина	Коэффициент влагопроводности в первый период сушки $k \times 10^8$, м ² /с	Коэффициент влагопроводности во второй период сушки $k \times 10^8$, м ² /с
$t_3 = 100^\circ C$, $h = 15$ см, $2R = 0,4$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м ²	5,86	2,17
$t_3 = 140^\circ C$, $h = 15$ см, $2R = 1,2$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м ²	12,30	3,97
$t_3 = 160^\circ C$, $h = 15$ см, $2R = 0,8$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м ²	10,50	6,98
$t_3 = 180^\circ C$, $h = 15$ см, $2R = 1$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м ²	15,80	7,91

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Удельная теплоемкость c :

Формулы для определения удельной теплоемкости и плотности казеина при $T = 283 \div 353$ К [20, 21]:

$$c_n = 4033 - 0,45 \times T \quad (196)$$

$$\rho = 1111 - 0,2 \times T - 0,0088 \times (T - 273)^2 \quad (197)$$

Таблица 23 – Удельная теплоемкость казеина образца в форме неограниченной пластины при разных режимах сушки

Режимы сушки	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг.К)
$t_3 = 100^\circ C$, $h = 15$ см, $2R = 0,4$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м ²	3886,3
$t_3 = 140^\circ C$, $h = 15$ см, $2R = 1,2$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м ²	3887,8
$t_3 = 160^\circ C$, $h = 15$ см, $2R = 0,8$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м ²	3885,3

Режимы сушки	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг.К)
$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м ²	3885,7

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Коэффициент температуропроводности казеина [21, 54]:

$$a = \frac{\lambda}{c \times \rho}, \quad (198)$$

где λ – коэффициент теплопроводности казеина, Вт/(м×К);

c – удельная теплоемкость казеина, Дж/(кг×К);

ρ – плотность казеина, кг/м³.

Таблица 24– Коэффициент температуропроводности казеина образца в форме неограниченной пластины

Режимы сушки	Коэффициент температуропроводности $a \times 10^8$, м ² /с
$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м ²	16,12
$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м ²	15,84
$t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м ²	16,35
$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м ²	16,25

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Коэффициент теплопроводность казеина, Вт/(м×К) [21, 52, 53]:

Коэффициент теплопроводности казеина в интервале $293 \div 363\text{K}$:

$$\lambda = 5,221 - 3,185 \times 10^{-2} T + 5,53 \times 10^{-5} \times T^2 \quad (199)$$

Таблица 25 – Коэффициент теплопроводности казеина образца в форме неограниченной пластины

Режимы сушки	Коэффициента теплопроводность казеина λ , Вт/(м×К)
$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м ²	0,714

Режимы сушки	Коэффициента теплопроводность казеина λ , Вт/(м×К)
$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{из}=3,97$ кВт/м ²	0,702
$t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{из}=3,42$ кВт/м ²	0,724
$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1$ см, $q_{из}=2,88$ кВт/м ²	0,720

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Тепловой расчет при ИК-излучении:

Уравнение теплового баланса теплопереноса при инфракрасном нагреве:

$$dQ_{\text{пог}} = dQ_{\text{вл.п.из}} + dQ_{\text{исп}} + dQ_{\text{в.из}}, \quad (200)$$

–Тепловой поток, поглощенный казеином при ИК – облучении за время $d\tau$:

$$dQ_{\text{пог}} = q \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau. \quad (201)$$

При известной плотности теплового потока излучателя ($q_{\text{пад}}$) Вт/м², запишем

$q = \varpi \times q_{\text{пад}}$, тогда:

$$dQ_{\text{под}} = \varpi \times q_{\text{пад}} \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau, \quad (202)$$

где ϖ – коэффициент поглощения;

$S_{\text{вл.п}}$ – площадь поверхности казеина облучаемой поверхности, м².

Таблица 26 – Энергия, поглощенная образцом казеина от излучателя:

$(q_{\text{пад}})$ Вт/м ²	Толщина образца казеина R , см	$S_{\text{п}}$, м ²	$Q_{\text{пог}}$, Дж
2020	0,4	0,12490	239,84
3420	0,8	0,16042	521,21
2880	1,0	0,17814	487,40
3970	1,2	0,19586	738,70

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

– Расход теплоты на нагрев продукта:

$$dQ_{\text{вл.п.из}} = G_{\text{вл.п}} \times c_{\text{вл.п}} \times dt_{\text{вл.п}}, \quad (203)$$

где $G_{\text{вл.п}}$ – масса облучаемого продукта, кг;

$c_{\text{вл.п}}$ – теплоемкость влажного продукта, Дж/(кг×К);

$dt_{\text{вл.п}}$ – изменение температуры продукта при ИК- воздействии, °С.

Таблица 27 – Расход теплоты на нагрев казеина

Режимы сушки	Температура продукта $t_{\text{вл.п}}, ^\circ\text{C}$	Начальная температура $t_0, ^\circ\text{C}$	Расход теплоты на нагрев казеина $dQ_{\text{вл.п.из}}$, Дж:
$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{\text{из}}=2,02$ кВт/м ²	52,80	25	2,16
$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{\text{из}}=3,97$ кВт/м ²	55,18	25	2,35
$t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{\text{из}}=3,42$ кВт/м ²	54,27	25	2,28
$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1$ см, $q_{\text{из}}=2,88$ кВт/м ²	49,68	25	1,92

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

– Потери теплоты нагреваемым образцом в окружающую среду

$$dQ_{\text{в.из}} = \alpha_{\text{общ}} \times (t_{\text{пов.п}} - t_{\text{ок}}) \times S_{\text{п}} \times d\tau, \quad (204)$$

где $\alpha_{\text{общ}} = \alpha + \alpha_{\text{изл}}$, α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²×К).

$\alpha_{\text{общ}} = 18 - 24$ Вт/(м²×К);

$t_{\text{пов.п}}$, $t_{\text{ок}}$ – температура поверхности казеина и воздуха окружающего казеина;

$S_{\text{п}}$ – поверхность продукта (испарения), которая не всегда равна поверхности облучения, м²;

$t_{\text{пов.п}}$, $t_{\text{ок}}$ – температура поверхности продукта и воздуха (среды), окружающего продукта.

Таблица 28 – Потери теплоты нагреваемым телом в окружающую среду

Режимы сушки	Температура продукта $t_{\text{пов.п}}, ^\circ\text{C}$	Температура Воздуха $t_{\text{о.к}}, ^\circ\text{C}$	Потери теплоты нагреваемым телом в окружающую среду $dQ_{\text{в.из}}, \text{Дж}$
$t_3=100^\circ\text{C}, h = 15\text{см}, 2R=0,4\text{ см}, q_{\text{уз}}=2,02\text{ кВт/м}^2$	52,80	72,99	45,42
$t_3=140^\circ\text{C}, h = 15\text{ см}, 2R= 1,2\text{ см}, q_{\text{уз}}=3,97\text{кВт/м}^2$	55,18	103,47	139,44
$t_3=160^\circ\text{C}, h = 15\text{см}, 2R= 0,8\text{ см}, q_{\text{уз}}=3,42\text{кВт/м}^2$	54,27	111,34	182,98
$t_3=180^\circ\text{C}, h = 15\text{см}, 2R= 1\text{ см}, q_{\text{уз}}=2,88\text{ кВт/м}^2$	49,68	88,15	135,62

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

–Расход теплового потока на испарение влаги с казеина

$$dQ_{\text{исп}} = j \times r^* \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau, \quad (205)$$

где j – интенсивность испарения влаги, кг/(м²×с);

r^* – удельная теплота парообразования влаги, Дж/кг. По данным [52], удельная теплота парообразования ($r^* = 2383$ Дж/кг).

Таблица 29 – Расход теплового потока на испарение влаги с казеина

Режимы сушки	Расход теплоты на испарение влаги из казеина, $dQ_{\text{исп}}, \text{Дж.}$
$t_3=100^\circ\text{C}, h = 15\text{ см}, 2R=0,4\text{ см}, q_{\text{уз}}=2,02\text{ кВт/м}^2$	192,26
$t_3=140^\circ\text{C}, h = 15\text{ см}, 2R= 1,2\text{ см}, q_{\text{уз}}=3,97\text{кВт/м}^2$	379,42
$t_3=160^\circ\text{C}, h = 15\text{ см}, 2R= 0,8\text{ см}, q_{\text{уз}}=3,42\text{кВт/м}^2$	486,60
$t_3=180^\circ\text{C}, h = 15\text{ см}, 2R= 1\text{ см}, q_{\text{уз}}=2,88\text{ кВт/м}^2$	238,31

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Расчет теплообменных процессов установки:

Для расчета теплообменных процессов установки использовали следующие формулы:

Тепло и массоотдачи для плоской поверхности казеина [20]:

$$Nu_t = 2 + A_1 \times Re^{n_1} \times pr^{0,33} \times Gu^{m_1}, \quad (206)$$

$$Nu_m = 2 + A_2 \times Re^{n_2} \times pr^{0,33} \times Gu^{m_2}, \quad (207)$$

где A_1, A_2, n_1, n_2 , – коэффициенты:

	A_1	n_1	A_2	n_2
$Re=(1-2) \times 10^2$	1,07	0,48	0,83	0,53
$Re=(3,15-22) \times 10^3$	0,51	0,61	0,49	0,61
$Re=(2,2-31,5) \times 10^4$	0,0027	0,90	0,25	0,90

Теплоотдача между движущимся горячим воздухом и стенками камеры, между влажным воздухом и поверхностью электрокалорифера [62]:

$$Nu_t = 0,032 \times Re^{0,8}; \quad (208)$$

Теплоотдача от поверхности изоляции сушилки в окружающую среду [3, 4]:

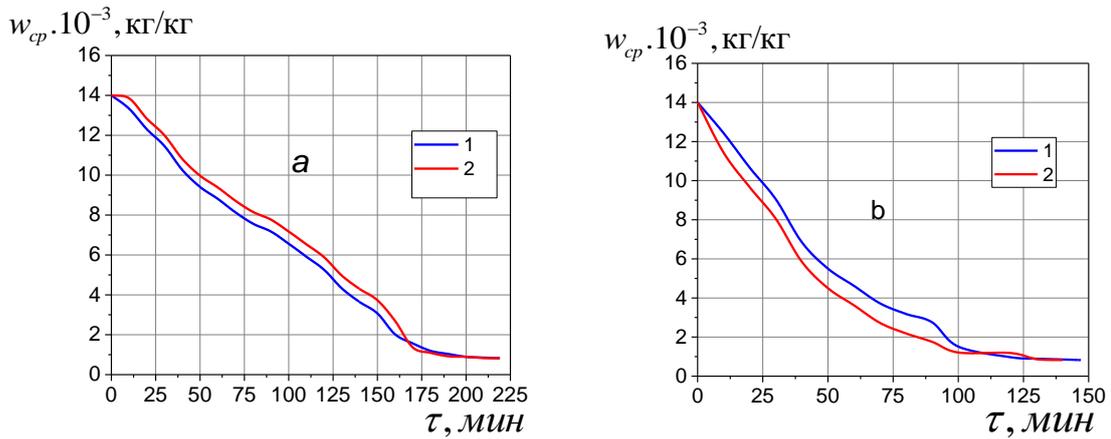
$$\alpha_{o.c} = 9,74 + 0,07 \times \Delta t; \quad (209)$$

где Δt – разность температур поверхности сушилки и окружающего воздуха.

Числа подобия представлены в таблиц Б.7 (приложение Б).

Полученные результаты расчета и экспериментальные данные сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве

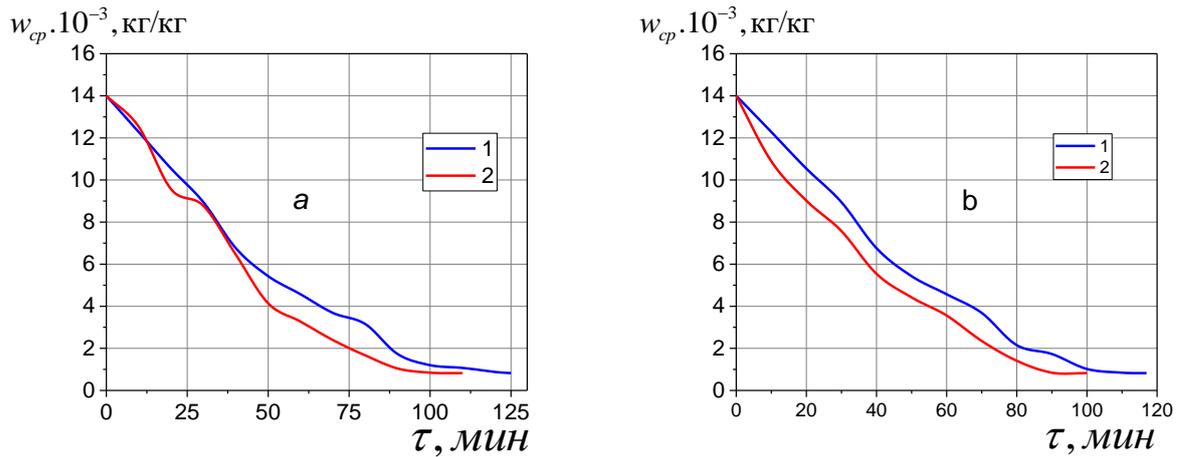
Полученные результаты расчета и экспериментальные данные сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве сопоставлены на рис. 47-48.



Режимы сушки a – $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$, $2R= 0,4\text{ см}$, $q_{из} = 2,02\text{ кВт/м}^2$, b – $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$,
 $2R= 1,2\text{ см}$, $q_{из} = 3,97\text{ кВт/м}^2$

Рисунок 47 – Сравнение расчетных кривых (2) и экспериментальных данных (1) сушки частиц казеина

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

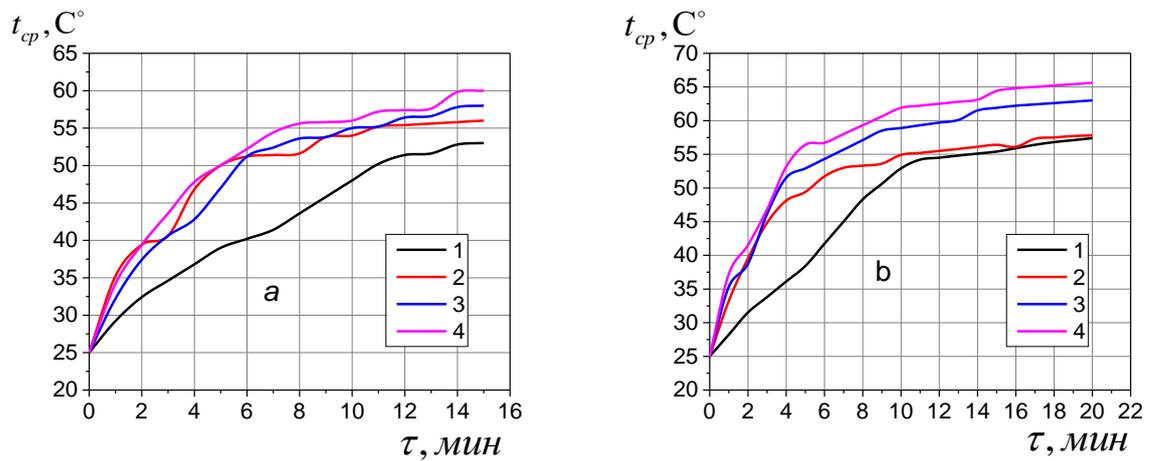


Режимы сушки a – $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$, $2R= 0,8\text{ см}$, $q_{из} = 3,42\text{ кВт/м}^2$, b – $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15\text{ см}$,
 $2R= 1\text{ см}$, $q_{из} = 2,88\text{ кВт/м}^2$

Рисунок 48– Сравнение расчетных кривых (2) и экспериментальных данных (1) сушки частиц казеина

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

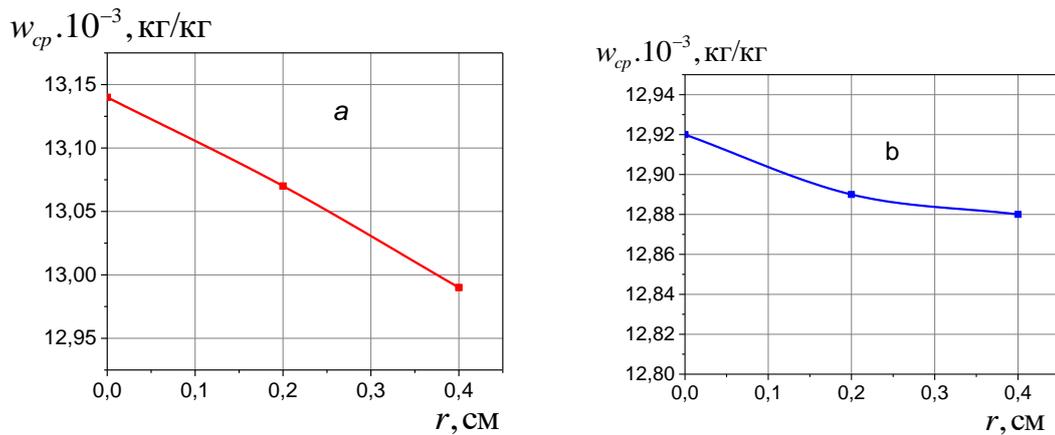
Из сравнения расчетных кривых и экспериментальных данных сушки частиц казеина (рис. 47-48), можно сделать вывод об их удовлетворительной схожести.



Режимы сушки: 1- $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м²; 2- $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{uz}=3,97$ кВт/м²; 3- $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{uz}=3,42$ кВт/м²; 4 - $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1$ см, $q_{uz}=2,88$ кВт/м²

Рисунок 49 – Сравнение экспериментальных данных (а) расчетных (b) температурных кривых нагрева частиц казеина

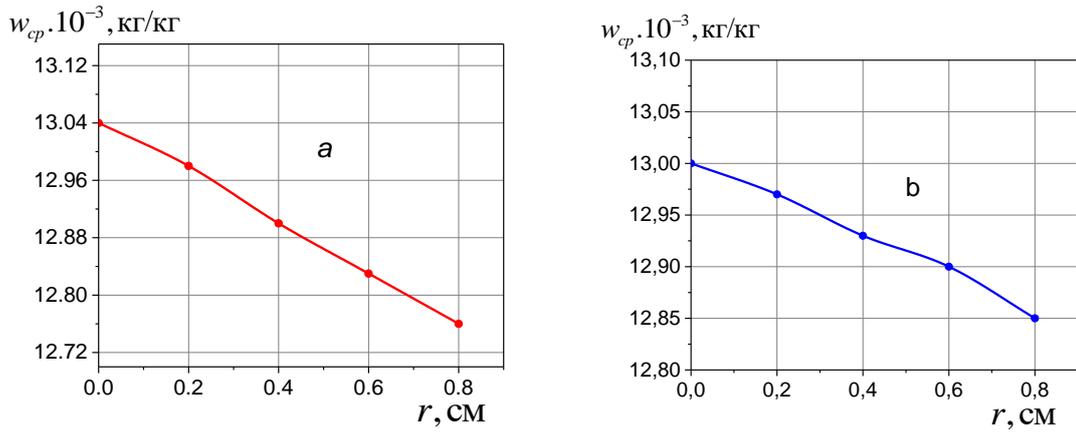
Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



Режим сушки $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q = 2,02$ кВт/м²

Рисунок 50 – Сравнение экспериментальных данных (а) расчетных (b) распределения влагосодержания по попутолщине (0,4 см) образца казеина по времени сушки

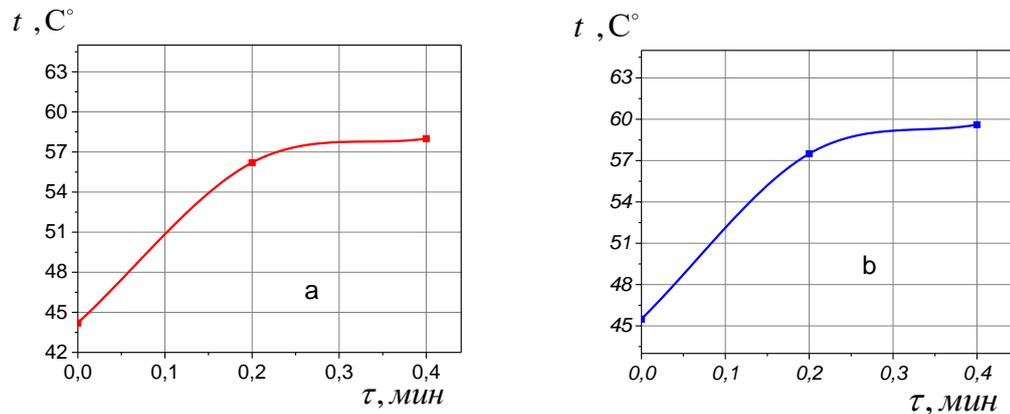
Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



Режим сушки $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q = 3,42$ кВт/м²

Рисунок 51 – Сравнение экспериментальных данных (а) расчетных (b) и распределения влагосодержания по попутолщине (0,8 см) образца казеина во времени сушки

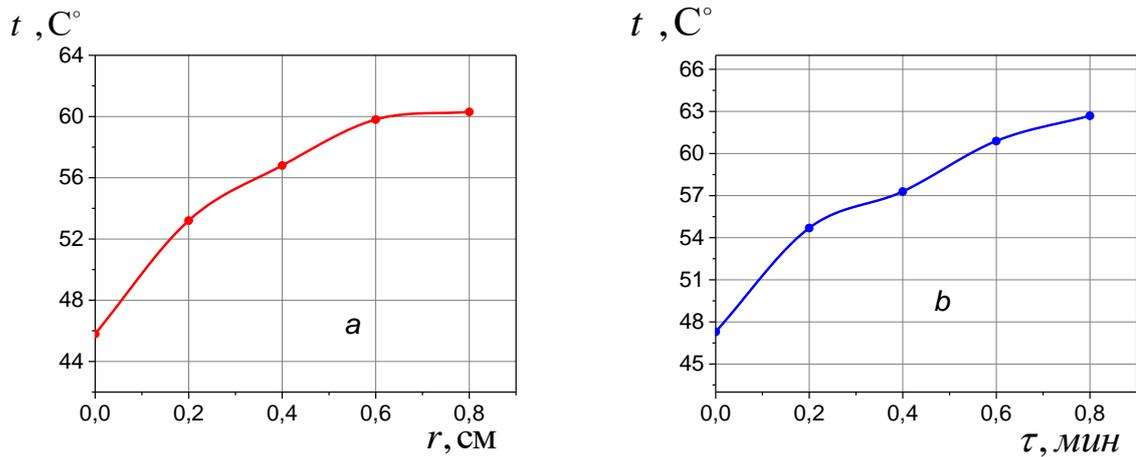
Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



Режим сушки $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q = 2,02$ кВт/м²

Рисунок 52 – Сравнение экспериментальных данных (а) расчетных(b) и распределения температуры по попутолщине (0,4 см) образца казеина во времени сушки

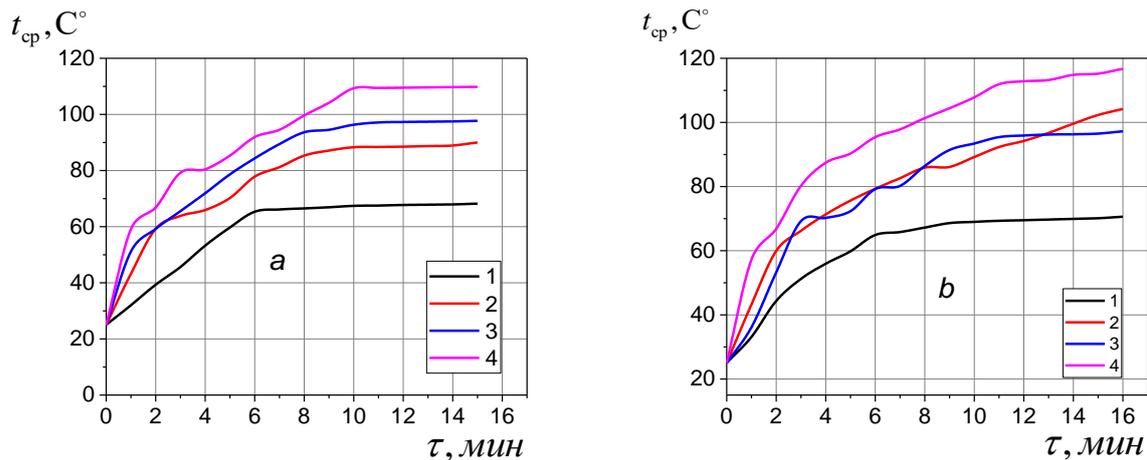
Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



Режим сушки $t_3=160^{\circ}\text{C}$, $h = 15 \text{ см}$, $q = 3,42 \text{ кВт/м}^2$

Рисунок 53 – Сравнение экспериментальных данных (а) расчетных (б) и распределения влагосодержания по попутолщине (0,8 см) образца казеина во времени

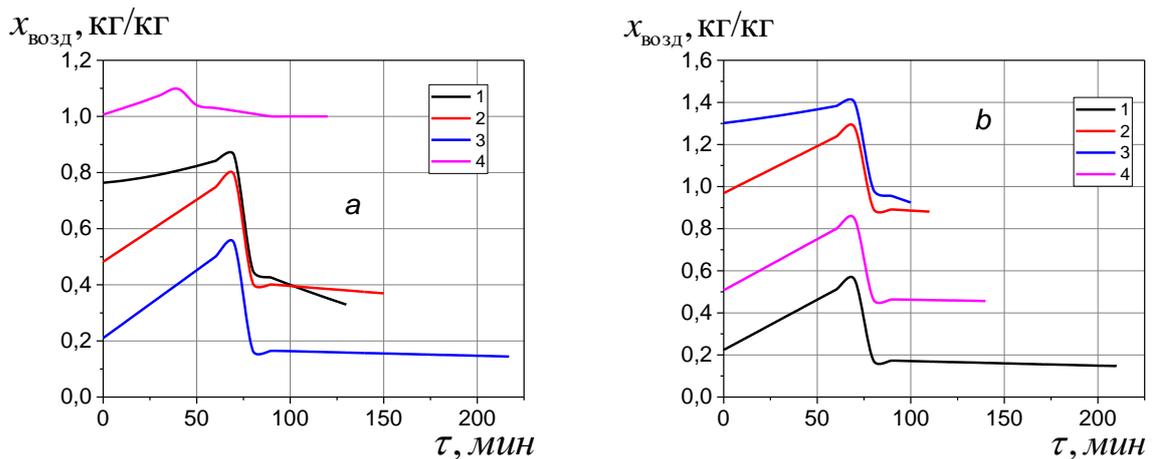
Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



Режимы сушки: 1- $t_3=100^{\circ}\text{C}$, $h = 15 \text{ см}$, $2R= 0,4 \text{ см}$, $q_{\text{уз}}=2,02 \text{ кВт/м}^2$; 2- $t_3=140^{\circ}\text{C}$, $h = 15 \text{ см}$, $2R= 1,2 \text{ см}$, $q_{\text{уз}}=3,97 \text{ кВт/м}^2$; 3- $t_3=160^{\circ}\text{C}$, $h = 15 \text{ см}$, $2R= 0,8 \text{ см}$, $q_{\text{уз}}=3,42 \text{ кВт/м}^2$; 4- $t_3=180^{\circ}\text{C}$, $h = 15 \text{ см}$, $2R= 1 \text{ см}$, $q_{\text{уз}}=2,88 \text{ кВт/м}^2$

Рисунок 54 – Сравнение экспериментальных данных (а), расчетных (б) температуры горячего воздуха внутри в камере

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований



Режимы сушки 1– $t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,4$ см, $q_{уз}=2,02$ кВт/м²; 2– $t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1,2$ см, $q_{уз}=3,97$ кВт/м²; 3– $t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 0,8$ см, $q_{уз}=3,42$ кВт/м²; 4 – $t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $2R= 1$ см, $q_{уз}=2,88$ кВт/м²

Рисунок 55 – Расчетные кривые изменения влагосодержания воздуха внутри сушилки

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Из сравнения расчетных кривых и экспериментальных данных сушки частиц казеина (рис. 47-55), можно сделать вывод об их удовлетворительной схожести. И полученные модели можно рекомендовать для практического применения.

Выводы по третьей главе

– Разработаны математические модели для решения задач распределения влажности и температуры в слоях казеина, средней влажности и температуры в слоях казеина и влажность и температуры горячего воздуха в камере в первый и второй период сушки.

– Для проверки адекватности полученных математических моделей, экспериментально исследовали процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве.

– Для выполнения расчетов сушки казеина и проверки адекватности математических моделей находили равновесные, диффузионные, тепловые и гидродинамические параметры процесса при комбинированном инфракрасном конвективном нагреве.

– Совпадение экспериментальных результатов и полученных результатов с помощью разработанных математических моделей позволяет сделать вывод об адекватности модели реальному процессу сушки казеина.

Глава 4 Практическая реализация результатов исследования процесса сушки казеина в производственных условиях

4.1 Разработка перспективной конструкции конвективной ленточной сушилки с комбинированным инфракрасным подводом теплоты

Конвейерная ленточная сушилка (рисунок 56) имеет корпус (5), внутри которого расположены три ленточных транспортера (11), девять инфракрасных излучателей, встроенных в верхнюю часть каждого транспортера (12). Влажный казеин загружается транспортером (6) на верхнюю ленту, последовательно перемещается с одной ленты на другую сверху вниз и выходит с нижней ленты со стороны, противоположной месту загрузки продукта в сушилку. На транспортере установлен раскладчик (7) скребкового типа, который приводится в движение от автономной приводной станции (13). Для конвективного нагрева предусмотрен сквозной поток для системы горячего воздуха (14). Влажный воздух удаляется через вытяжные камеры (1) с помощью осевых вентиляторов (3) через воздухопроводы (15). Вытяжные камеры снабжены клапанами (4) для регулирования отвода сушильного агента.

Тепловой расчет трехъярусной ленточной сушильной установки

В сушилку поступает казеин с влажностью (процент) w_0 и температура t_n ; температура горячего воздуха (градус) на входе в камеру t_2 и на выходе из нее t_i ; начальная температура влажного казеина t_n градус; дисперсный состав продукта \bar{d}_3 м; коэффициент формы f ; параметры атмосферного воздуха, поступающего в калорифер: температура t_1 , градус; относительная влажность φ_0 (процент); влагосодержание x_1 , кг/кг; производительность (кг/ч) по высушенному G_2 или влажному G_1 продукту. Влагосодержание воздуха x_2 в любой точке сушильной камеры равно влагосодержанию $x_3(\tau)$ воздуха на выходе из камеры; на первой ленте влагосодержание казеина снижается с 70 % до 45 %, на второй ленте снижается с 45 % до 19 %, на третьей зоны - с 19 % до 12 % с температурой $t_{c.п.}$.

Исходные данные для расчета установки предоставлены в таблице 30.

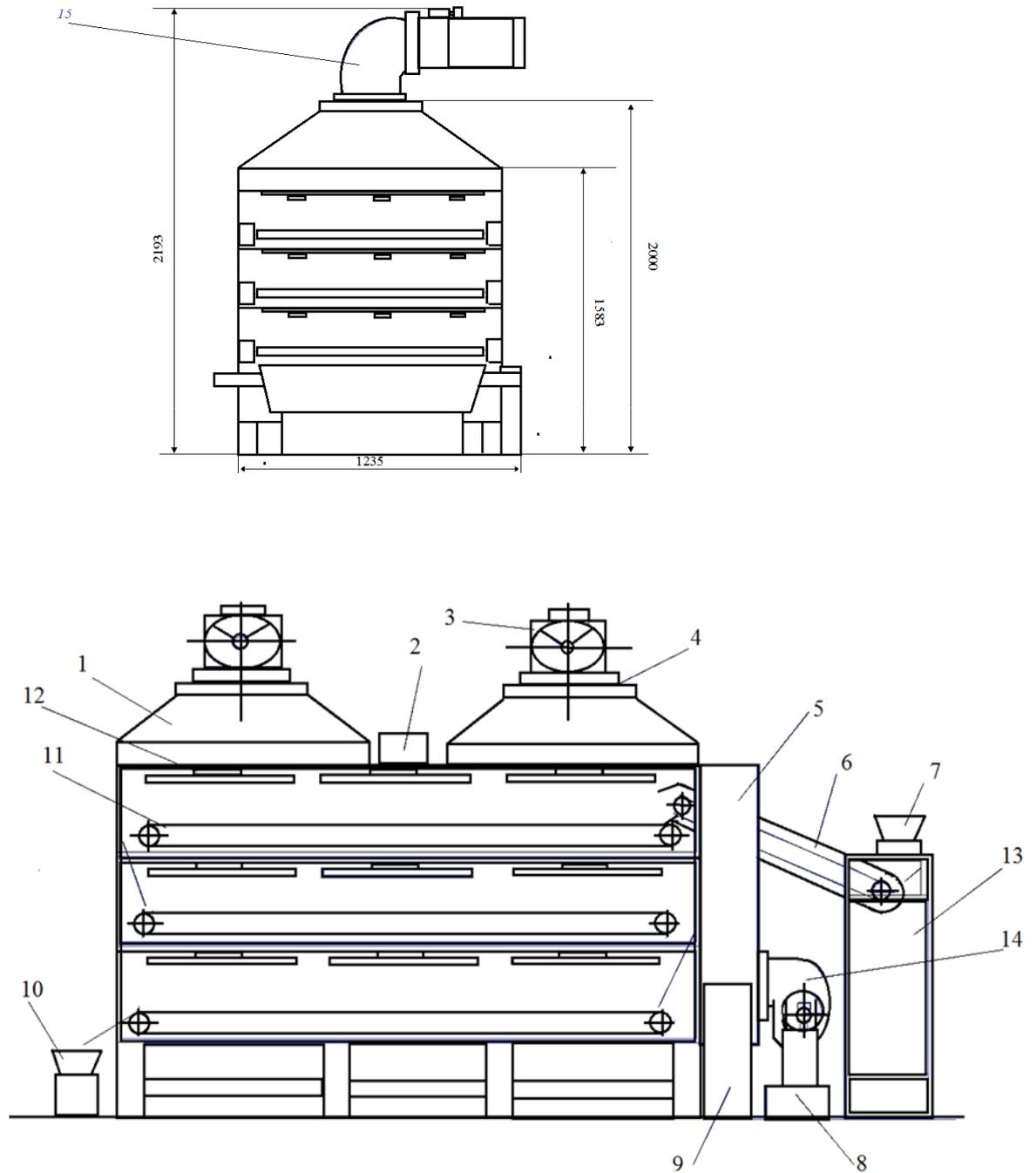


Рисунок 56 – Конструкция конвекционной ленточной сушилки непрерывного действия с комбинированным инфракрасным подводом теплоты

Источник: Составлено автором

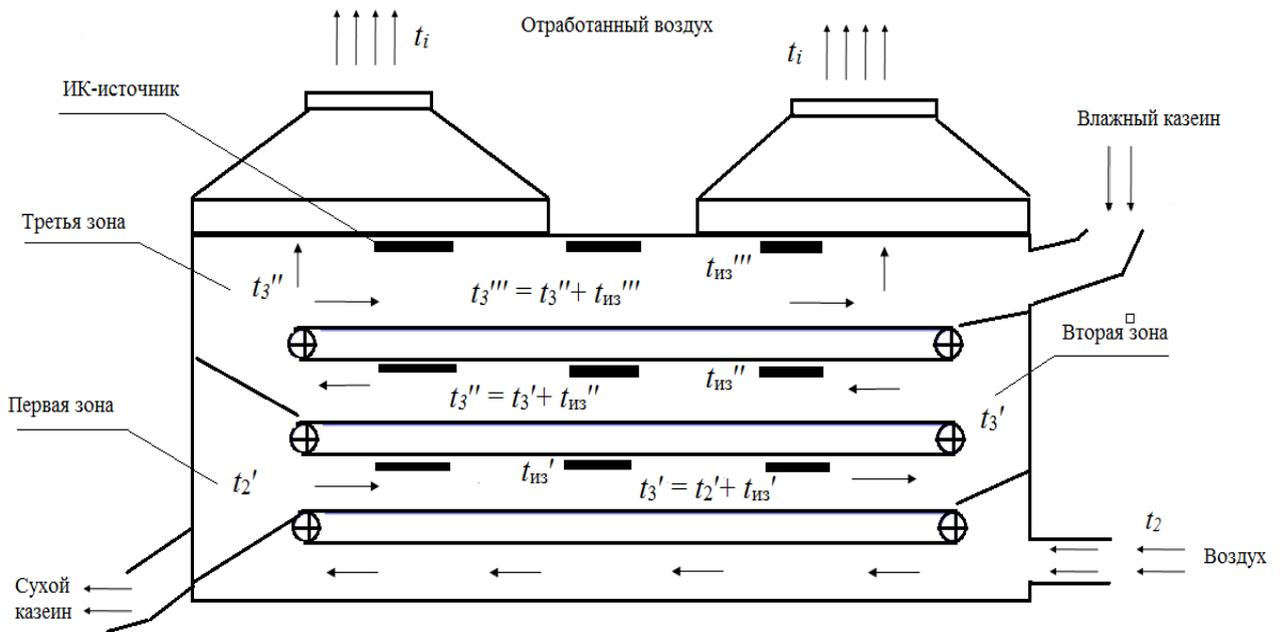


Рисунок 57 – Схема ленточной установки

Источник: Составлено автором

Таблица 30 – Исходные данные для расчета ленточной сушилки с комбинированным инфракрасным подводом теплоты

Исходные данные для расчета ленточной сушилки с комбинированным инфракрасным подводом теплоты	
Производительность установки по высушенному продукту G_2 , кг/ч	50
Влажность казеина (%)	
Начальная влажность w_0	70
Конечная влажность $w_{c.п}$	12
-Температура горячего воздуха поступающего в камеру, °C=100:	
Температура воздуха на входе 1-й зоны t_2	100
температура в первой зоне t_3'	113
температура во второй зоне t_3''	119
температура в третьей зоне t_3'''	124
На выходе из сушильной камеры $t_3''' = t_i$	124
-Температура горячего воздуха поступающего в камеру, °C=140:	
Температура воздуха на входе 1-й зоны t_2	140
температура в первой зоне t_3'	148
температура во второй зоне t_3''	155
температура в третьей зоне t_3'''	163
На выходе из сушильной камеры $t_3''' = t_i$	163

Исходные данные для расчета ленточной сушилки с комбинированным инфракрасным подводом теплоты	
-Температура горячего воздуха поступающего в камеру, °C=160: Температура воздуха на входе 1-й зоны t_2 температура в первой зоне t_3' температура во второй зоне t_3'' температура в третьей зоне t_3''' На выходе из сушильной камеры $t_3''' = t_i$	160 169 176 189 189
-Температура горячего воздуха поступающего в камеру, °C=180: Температура воздуха на входе 1-й зоны t_2 температура в первой зоне t_3' температура во второй зоне t_3'' температура в третьей зоне t_3''' На выходе из сушильной камеры $t_3''' = t_i$	180 186 195 202 202
Температура влажного казеина, поступающего в камеру, °C, t_n Температура сухого казеина на выходе из сушильной камеры $t_{c.п}$ -при температуре воздуха 100 °C -при температуре воздуха 140 °C -при температуре воздуха 160 °C -при температуре воздуха 180 °C	25 57 62 69 72
Теплоемкость высушенного казеина $c_{п}$, кДж/(кг·К)	3,88
Параметры атмосферного воздуха, поступающего в калорифер: температура t_1 , °C влажностное содержание x_1 , кг/кг	25 0,018

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Результаты расчета установки представлены в таблице (31).

Таблица 31– Результаты расчета установки

Результаты расчета установки	
Производительность установки по влажному продукту G_1 , кг/ч.	146.6
Производительность установки по испаренной влаге W , кг/ч.	96.6
Количество испаренной влаги в 1-й зоне (на верхней ленте) W' , кг/ч.	58,6
Количество влажного казеина, подаваемого в единицу времени во 2-ю зону (на вторую ленту) $G_{п}'$, кг/ч.	88

Результаты расчета установки			
Количество испаренной влаги во 2-й зоне (на второй ленте) W'' , кг/ч.		33	
Количество казеина, подаваемого в единицу времени в 3-ю зону (на третью ленту) G_{II}'' , кг/ч.		55	
Количество испаренной влаги в 3-й зоне W''' , кг/ч.		4,99	
Энтальпия атмосферного воздуха, поступающего в калорифер, кДж/кг.		71,01	
Энтальпия влажного воздуха, поступающего в сушилки I_1 , кДж/кг.	Температура влажного воздуха	100 °С	149,42
		140 °С	191,23
		160 °С	201,14
		180 °С	233,05
Общие тепловые потери в установке, рассчитанные на 1 кг испаренной влаги Δ , кДж/кг.	Температура влажного воздуха	100 °С	-312,49
		140 °С	-384,78
		160 °С	-411,29
		180 °С	-437,8
Влагосодержание влажного воздуха на выходе из 3-й зоны x_3 , кг/кг.	Температура влажного воздуха	100 °С	0,0130
		140 °С	0,0150
		160 °С	0,0108
		180 °С	0,0158
Энтальпия влажного воздуха на выходе из 3-й зоны, кДж/кг.	Температура влажного воздуха	100 °С	149,43
		140 °С	191,24
		160 °С	201,21
		180 °С	233,03

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

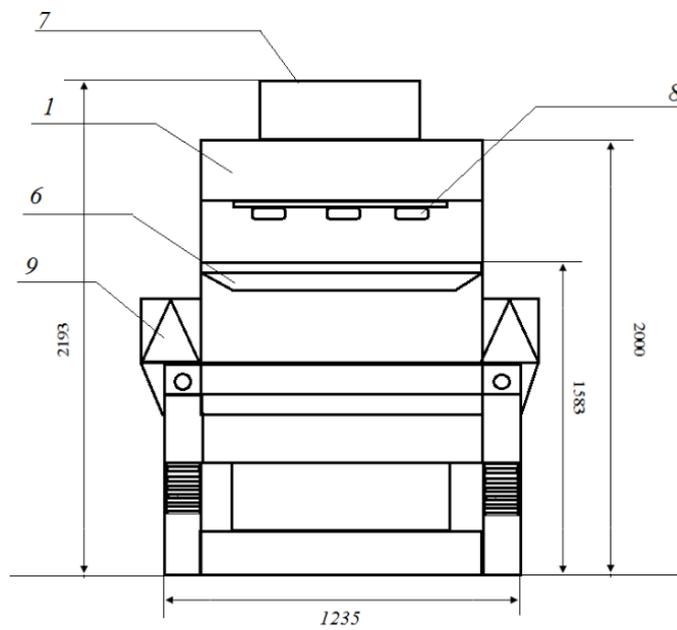
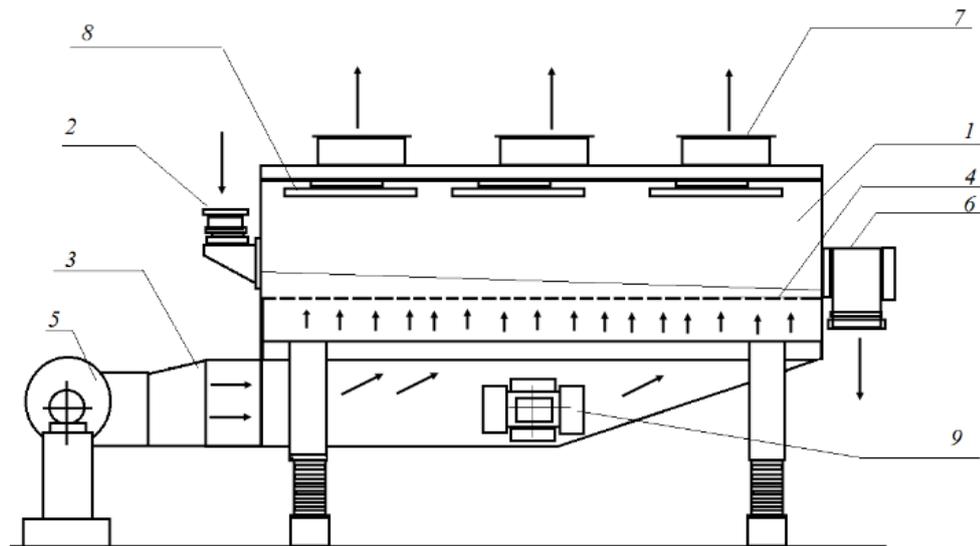
4.2 Разработка конструкции сушилки виброаэрокипящего слоя с использованием ИК - нагрева

Сушка казеина в сушилке виброаэрокипящего слоя с использованием ИК-нагрева характеризуется высокой интенсивностью. Установки интенсифицируют теплообмен, обеспечивают более равномерное время пребывания частиц в слое и меньшие энергозатраты. На рисунке 58 представлена схема установки с виброкипящим слоем.

Установка состоит из: сушильной камеры(1); электронагревателя и воздухоудовки (5); источника инфракрасного излучения (8); источника вибраций (вибраторы) (9); патрубка для ввода влажного казеина (2); патрубка для ввода горячего воздуха(3); газораспределительной решетки (4); патрубка для выгрузки высушенного казеина (6); патрубка вывода отработанного теплоносителя (7).

Тепловой расчет установки:

В сушилку поступает казеин с влажностью (процент) w_0 и температурой t_n ; температура горячего воздуха (градус) на входе в камеру t_2 и на выходе из нее t_i ; начальная температура влажного казеина t_n градус; дисперсный состав продукта \bar{d}_3 м; коэффициент формы f ; параметры атмосферного воздуха, поступающего в калорифер: температура t_1 , градус; относительная влажность φ_0 (процент); влагосодержание x_1 , кг/кг; производительность (кг/ч) по высушенному G_2 или влажному G_1 продукту. Влагосодержание воздуха в любой точке сушильной камеры равно влагосодержанию $x_3(\tau)$ воздуха на выходе из камеры; на первой ленте влагосодержание казеина снижается с 70 % до 45 %, на второй ленте снижается с 45 % до 19 %, на третьей зоны - с 19 % до 12 % с температурой $t_{c.n}$. Исходные данные для расчета установки предоставлены в таблице 32.



**Рисунок 58 – Сушилка виброаэрокипящего слоя с использованием ИК-нагрева
для сушки казеина**

Источник: Составлено автором

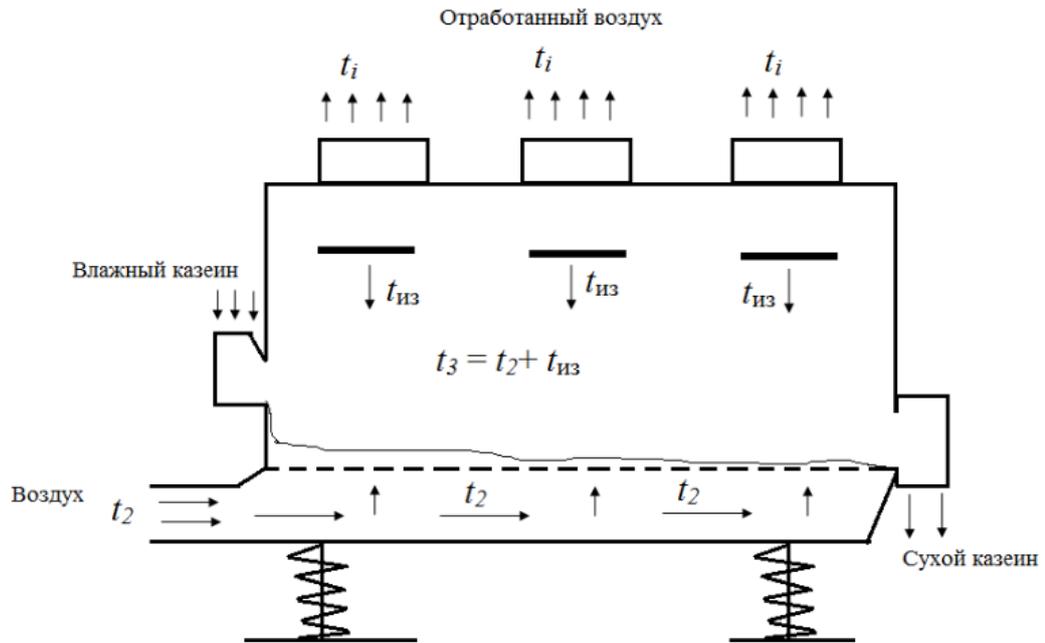


Рисунок 59 – Схема сушилки виброаэрокипящего слоя с использованием ИК-нагрева для сушки казеина

Источник: Составлено автором

Таблица 32 – Исходные данные для расчета сушилки виброаэрокипящего слоя с использованием ИК-нагрева

Исходные данные для расчета сушилки виброаэрокипящего слоя с использованием ИК-нагрева	
Производительность установки по высушенному продукту G_2 , кг/ч	70
-Влажность казеина (%)	
Начальная влажность казеина w_0	70
Конечная влажность сухого казеина $w_{с.п}$	12
-Температура влажного воздуха, поступающего в камеру, °С=100:	
Температура влажного воздуха на входе камеры t_2	100
В камере t_3	129
На выходе из сушильной камеры $t_3 = t_i$	129
-Температура влажного воздуха, поступающего в камеру, °С=140:	
Температура влажного воздуха на входе камеры t_2	140
В камере t_3	154
На выходе из сушильной камеры $t_3 = t_i$	154
-Температура влажного воздуха, поступающего в камеру, °С=160:	
Температура влажного воздуха на входе камеры t_2	160
В камере t_3	179
На выходе из сушильной камеры $t_3 = t_i$	179

Исходные данные для расчета сушки виброаэрокипящего слоя с использованием ИК-нагрева	
-Температура влажного воздуха, поступающего в камеру, °С=180: Температура влажного воздуха на входе камеры t_2 В камере t_3 На выходе из сушильной камеры $t_3 = t_i$	180 192 192
Температура влажного казеина поступающего в камеру, °С, t_n	25
Температура сухого казеина на выходе из сушильной камеры $t_{c.п}$ -при температуре воздуха 100 °С -при температуре воздуха 140 °С -при температуре воздуха 160 °С -при температуре воздуха 180 °С	59 67 72 76
Теплоемкость высушенного казеина $c_{п}$, кДж/(кг·К)	3,8863
Параметры атмосферного влажного воздуха, поступающего в калорифер: температура t_1 , °С влажность x_1 , кг/кг	25 0,018
Средний эквивалентный диаметр частиц $d_э$, мм	1,0
Плотность высушенного казеина ρ_m , кг/м ³	1388
Частота вибраций решетки f , Гц	15
Высота слоя казеина H_0 , м.	0,03
амплитуда колебаний A , мм.	2

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Результаты расчета установки представлены в таблице 33 и 34.

Таблица 33 – Результаты расчета установки

Результаты расчета установки	
Производительность установки по влажному продукту G_1 , кг/ч.	205,3
Производительность установки по испаренной влаге W , кг/ч.	135,3
Количество испаренной влаги в час, кг/ч.	135,1

Результаты расчета установки				
Количество продукта в час, выходящего из аппарата, кг/ч.	70			
Энтальпия атмосферного воздуха, поступающего в калорифер, кДж/кг.	71,01			
Массовый расход воздуха L , кг/ч.	135 310			
Массовый расход атмосферного воздуха в аппарате L_1 , кг/ч.	13774,55			
	Температура горячего воздуха			
	100 °С	140 °С	160 °С	180 °С
Энтальпия воздуха, выходящего из аппарата, кДж/кг.	179,73	205,87	232,01	245,60
Затраты теплоты на нагрев материала q_M , кДж/кг.	168,88	215,12	233,21	263,37
Потери теплоты в окружающую среду $q_{пот}$, кДж/кг.	277,18	293,87	303,47	302,47
Тепловые потери в установке, отнесенные к 1 кг испаренной влаги Δ , кДж/кг,	-341,31	-404,24	-431,93	-461,09
Влагосодержание воздуха, выходящего из аппарата x_3 , кг/кг.	0,017	0,016	0,017	0,017
	Температура горячего воздуха			
	100 °С	100 °С	100 °С	100 °С
Удельный расход теплоты в сушилки q_y , кДж/кг.	108720	67430	161000	174590
Общий расход теплоты Q , кВт.	4086,3	2534,43	6051,36	6562,15
Удельный расход сухого воздуха $ l $, кг/кг.	1000	1000	1000	1000
Удельный объем влажного воздуха на выходе из аппарата $v_{уд}$, м ³ /кг	0,56	0,59	0,63	0,65
Объемный расход влажного воздуха на выходе из аппарата V , м ³ /кг	7713,75	8126,98	8677,97	8953,46

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

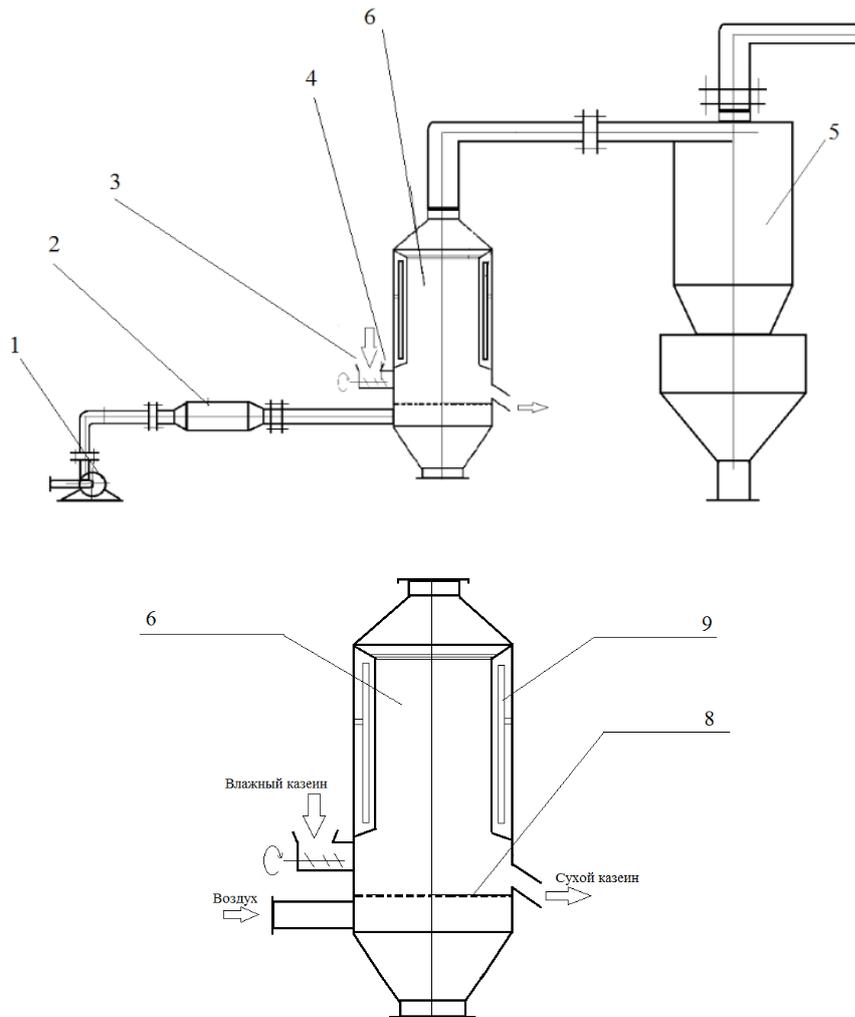
Таблица 34 – Гидродинамический расчет установки

Гидродинамический расчет установки				
	температура теплоносителя			
Средняя плотность и кинематическая вязкость воздуха в слое $\rho_2 \approx \rho_6$, кг/м ³	1,81	1,72	1,61	1,56
Средняя плотность и кинематическая вязкость воздуха в слое $\rho_2 \approx \rho_6$, кг/м ³	1,81	1,72	1,61	1,56
Критерий Архимеда Ar	30 095	31672	33 838	34 924
Критическое значение критерия Рейнольдса	13,05	13,59	14,33	14,70
Критерий Лященко	0,07	0,08	0,09	0,09
Критическая скорость псевдооживления $v_{кр}$, м/с	0,21	0,21	0,23	0,23
Число псевдооживления k	7,54	7,21	6,93	6,93
Скорость газа, рассчитанная на полное сечение решетки v , м/с	1,58	1,51	1,59	1,59
Площадь решетки $S_{реш}$, м ²	1,36	1,50	1,52	1,56
Скорость начала псевдооживления при вибрации решетки v_n , м/с	1,14	1,17	1,22	1,25
Порозность виброкипящего слоя при скорости воздуха ε ,	0,78	0,78	0,77	0,79

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

4.3 Разработка конструкции сушиллки фонтанирующего слоя с использованием инфракрасного нагрева

Установка представляет собой аппарат непрерывного действия, ее принимают как для удаления поверхностей и слабосвязанной влаги, так и связанной влаги из мелкозернистого казеина. Схема сушиллки представлена на рисунке 60.



1 – вентилятор; 2– калорифер; 3– бункер; 4– шнек; 5–циклон; 6– корпус; 7 – выгрузной патрубков; 8 – газораспределительная решетка, 9 – кварцевые галогеновые трубки

Рисунок 60 – Установка с фонтанирующим слоем и инфракрасным нагревом

Источник: Составлено автором

Влажный казеин непрерывно подается в сушилку. Теплоноситель, нагнетаемый вентилятором, нагревается в калорифере и поступает в сушилку под газораспределительную решетку. Сушка казеина происходит в зоне аппарата, примыкающей к газораспределительной решетке. Для обеспечения инфракрасного энергоподвода в рабочую зону сушки по высоте сушильной камеры установлены кварцевые галогеновые трубки. Высушенный казеин удаляется из сушилки через патрубков.

Тепловой расчет установки:

Исходные данные для расчета установки предоставлены в таблице 35.

Таблица 35 – Исходные данные для расчета установки

Исходные данные для расчета установки	
Производительность установки по высушенному продукту G_2 , кг/ч	75
– влажность казеина (%) Начальная влажность казеина w_0 Конечная влажность сухого казеина $w_{c.п}$	70 12
– Температура влажного воздуха поступающего в камеру, °C=100: На входе камеры t_2 В камере t_3 На выходе из сушильной камеры $t_3 = t_i$	100 120 120
–Температура влажного воздуха поступающего в камеру, °C=140: На входе камеры t_2 В камере t_3 На выходе из сушильной камеры $t_3 = t_i$	140 149 149
–Температура влажного воздуха, поступающего в камеру, °C=160: На входе камеры t_2 В камере t_3 На выходе из сушильной камеры $t_3 = t_i$	160 173 173
–Температура влажного воздуха поступающего в камеру, °C=180: На входе камеры t_2 В камере t_3 На выходе из сушильной камеры $t_3 = t_i$	180 187 187
–Температура влажного казеина, поступающего в сушку, °C, t_n Температура сухого казеина на выходе из сушильной камеры $t_{c.п}$	25
– при температуре воздуха 100 °C	56
– при температуре воздуха 140 °C	66
– при температуре воздуха 160 °C	70
– при температуре воздуха 180 °C	71

Исходные данные для расчета установки	
Теплоемкость высушенного казеина c_{II} , кДж/(кг×К)	3,8863
Параметры атмосферного влажного воздуха, поступающего в калорифер: Температура воздуха t_1 , °С влагосодержание x_1 , кг/кг	25 0,018
Средний эквивалентный диаметр частиц $d_э$, мм	1,0
Плотность высушенного казеина ρ_m , кг/м ³	1388
Продолжительность сушки казеина τ_c , мин –при температуре воздуха 100 °С –при температуре воздуха 140 °С –при температуре воздуха 160 °С –при температуре воздуха 180 °С	123 129 147 216
Средняя насыпная плотность сухого казеина ρ_n , кг/м ³	460

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Результаты расчета установки представлены в таблице 36 и 37.

Таблица 36– Результаты расчета установки

Результаты расчета установки				
Производительность установки по влажному продукту G_1 , кг/ч.	220			
Производительность установки по испаренной влаге W , кг/ч.	145			
Количество сухого казеина в час, выходящего из аппарата, кг/ч.	75			
Энтальпия атмосферного влажного воздуха, поступающего в калорифер, кДж/кг.	71,01			
Массовый расход воздуха L , кг/ч.	145000			
	температура теплоносителя			
	100 °С	100 °С	100 °С	100 °С
Энтальпия воздуха, выходящего из аппарата, кДж/кг.	170,32	200,64	225,73	240,37
Затраты теплоты на нагрев материала q_m , кДж/кг.	167	218,17	231,91	261,41

Результаты расчета установки				
Потери теплоты в окружающую среду $q_{\text{пот}}$, кДж/кг.	279,16	284,28	285,65	288,60
Тепловые потери в установке, отнесенные к 1 кг испаренной влаги Δ , кДж/кг,	-341,41	-397,70	-412,81	-445,26
Влагосодержание воздуха, выходящего из аппарата x_3 кг/кг	0,019	0,019	0,019	0,019
Удельный расход теплоты в сушилки q_y , кДж/кг.	99310	147160	154720	240370
Общий расход теплоты Q , кВт.	3999,9	5927,2	6231,7	9681,5
Удельный расход сухого воздуха $ l $, кг/кг.	1000	1000	1000	1000
Удельный объем влажного воздуха на выходе из аппарата $v_{\text{уд}}$, м ³ /кг	0,59	0,61	0,71	0,76
Объемный расход влажного воздуха на выходе из аппарата V , м ³ /кг	87089,9	90042,1	104803,1	112183,6

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Таблица 37 – Гидродинамический расчет установки

Гидродинамический расчет установки				
	температура теплоносителя			
Средняя плотность и кинематическая вязкость воздуха в слое $\rho_z \approx \rho_v$, кг/м ³	1,73	1,67	1,43	1,34
Критерий Архимеда Ar	31488,83	32621,58	38103,13	40664,93
Критическое значение критерия Рейнольдса $Re_{\text{вит}}$	13,54	13,92	15,75	16,58
Скорость витания частиц м/с.	0,50	0,52	0,60	0,64
скорость начала устойчивого фонтанирования $Re_{\text{н.ф}}$	15,13	15,56	17,60	18,53
скорость начала устойчивого фонтанирования $v_{\text{н.ф}}$, м/с	0,24	0,25	0,28	0,29
Скорость газа во входном нижнем сечении v_1 , м/с	0,48	0,50	0,56	0,58
Объем слоя казеина в аппарате $V_{\text{сл}}$, м ³	0,66	0,69	0,79	1,15

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

4.4 Использование результатов работы в промышленном производстве

С помощью разработанных математических моделей можно решить задачи: распределения влажности и температуры в слоях казеина, средней влажности и температуры в слоях казеина и влажность, и температуры горячего воздуха в камере в первый и второй период сушки.

В сушилку поступает казеин с влажностью (процент) w_0 и температура t_n ; температура горячего воздуха (градус) на входе в камеру t_2 и на выходе из нее t_i ; начальная температура влажного казеина t_n градус; дисперсный состав продукта \bar{d}_3 , м; коэффициент формы f ; параметры атмосферного воздуха, поступающего в калорифер: температура t_1 , градус; относительная влажность φ_0 (процент); влаго-содержание x_1 , кг/кг; производительность (кг/ч) по высушенному G_2 или влажно-му G_1 продукту; массовый расход L_v , общая площадь поверхности камеры составляет $S_{\text{ап}}$, временной шаг расчета Δt .

Методика расчета включает следующие этапы:

–Исходные данные для расчета:

коэффициент теплопроводности казеина k по уравнению (192), удельная теплоемкость c по уравнению (196), коэффициент температуропроводности казеина a по уравнению (198), коэффициент теплопроводности казеина λ по уравнению (199), тепловой расчет при ИК- излучение по формулам (200) - (205). Для расчета теплообменных процессов в сушилке были использованы формулы (206) - (209).

–Расчет распределения влажности в слоях казеина, средней влажности в слоях казеина и влажности горячего воздуха в камере по уравнениям (156), (157) и (158), соответственно.

–Расчет распределения температуры в слоях казеина, температуры в слоях казеина и температуры горячего воздуха в камере по уравнениям (189), (190) и (191), соответственно.

Блок-схема алгоритма для расчета сушки казеина представлена на рисунке 61.

В пищевой промышленности, основным оборудованием для производства технического казеина является поточно-механизованная линия типа Я9-ОКЛ. Сушка казеина осуществляется в сушилках кипящего слоя типа ВС-150КПИ.

Главный недостаток линии – высокие удельные энергетические затраты, около 85 % приходится на обеспечение работы сушилки.

Способы снижения энергетических затрат при сушке казеина можно разделить на технологические и конструктивные. Технологические способы связаны с повышением эффективности сушки и процессов тепло и влагопереноса между казеином и горячим воздухом. Конструктивный способ направлен на улучшение конструкций и конструктивных элементов сушильной камеры.

В таблице 38 даны основные технические характеристики предлагаемых сушилок и промышленной сушилки ВС-150КПИ.

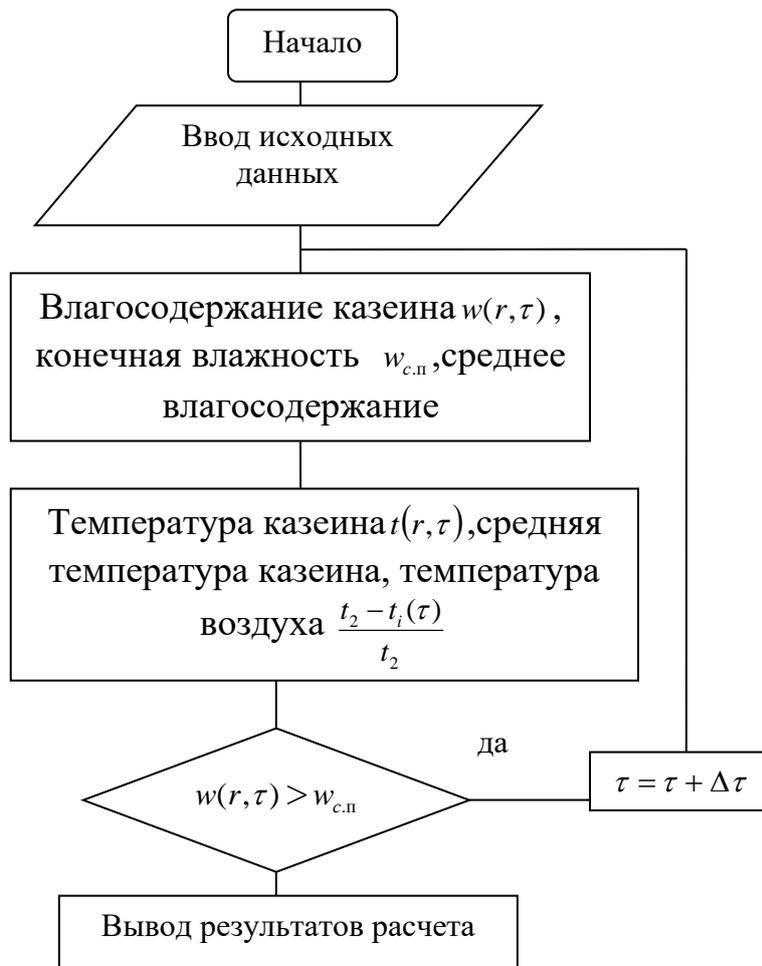


Рисунок 61 – Блок-схема алгоритма для расчета сушки казеина

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Таблица 38 – Технические характеристики предлагаемых сушилок и промышленной сушилки ВС–150КПИ.

Наименование	ВС-150КПИ	Конвекционная ленточная сушилка с ИК-нагрева	Сушилка виброаэро-кипящего слоя с ИК-нагрева	Сушилка фонтанирующего слоя с ИК-нагрева
Производительность по высушенному продукту, кг/ч	115,0	50-95	70-110	75-119
Температура воздуха перед фильтром на воздухозаборе, °С	18	25	25	25
Температура воздуха на входе в аппарат вихревого псевдооживленного слоя, °С,	120	100,140,160,180	100,140,160,180	100,140,160,180

Наименование	ВС-150КПИ	Конвекционная ленточная сушилка с ИК-нагрева	Сушилка виброаэро-кипящего слоя с ИК-нагрева	Сушилка фонтанирующего слоя с ИК-нагрева
Температура казеина в зоне сушки, °С	40. .60	55-72	59-76	56-71
Влажность казеина, % (массовая) начальная до сушки	60±2	(60-70)	(60-70)	(60-70)
Влажность казеина, % , конечная после сушки	8. .12	10. .12	10. .12	10. .12
Объемный расход влажного воздуха на выходе из аппарата, м ³ /кг	8500	7890-9568	7713-8953	8780-11218
Удельный расход электроэнергии на 1 кг испаренной влаги, кВт ч/кг	0,23	0,15 - 0,20	0,14 - 0,17	0,14-0,16
Удельный расход пара на 1 кг испаренной влаги, кг/кг	2,3	0,60 - 1,2	0,56-0,65	0,59-0,77

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Анализ технических характеристик предлагаемых сушилок и промышленной сушилки ВС-150КПИ (табл. 38) свидетельствует о том, что использование комбинированного конвективного и инфракрасного подвода теплоты в сравнении с существующим способом, уменьшают удельный расход пара на 1 кг испаренной влаги и удельный расход электроэнергии на 1 кг испаренной влаги. Это позволило повысить производительность сушилки до 137 кг сухого продукта в час.

В реальных производственных условиях достигнута влажность казеина-сырца, направляемого на сушку до 70 % – 60 %, повышается производительность сушилки до 120 кг сухого продукта в час при температуре теплоносителя 100°С. В таблице 39 даны основные качественные характеристики казеина, высушенного промышленным и предлагаемым способами.

Таблица 39 – Качественные характеристики казеина, высушенного промышленным и предлагаемым способами

Наименование показателя	Промышленный способ	Предлагаемый способ
Внешний вид	Сухое зерно	Сухое зерно
Цвет	Светло кремовый с включением белых и коричневых гранул в количестве 2-3 %	Белый или с кремовым оттенком, равномерный по всей массе
Форма и структура	Зерно плотное, произвольной формы	Сухие гранулы с незначительным количеством сухого порошка
Вкус и запах	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов
Консистенция	Сыпучая	Сыпучая
Содержание		
Влаги, %	12	12
Жиры, %	1,5	1,5
Кислотность, °Т	40	40
Объем осадка на 1г казеина, см ³	0,2	0,1

Источник: Составлено автором по результатам проведенных исследований

Анализ качественных показателей свидетельствует о том, что качество казеина, высушенного предлагаемым комбинированным способом конвективным и инфракрасным подводом теплоты в сравнении с существующим способом, повышают эффективность, объём осадка уменьшается более чем в два раза и улучшается внешний вид готового продукта.

Выводы по четвертой главе

– Разработаны проектные конструктивные решения конвективной ленточной сушилки, установок виброаэрокипящего и фонтанирующего слоя с комбинированным инфракрасным подводом теплоты, позволяющие повысить эффективность процесса сушки казеина;

– проведены расчеты конвективной ленточной сушилки, установок виброаэрокипящего и фонтанирующего слоя с комбинированным инфракрасным подводом теплоты;

- разработан алгоритма расчета процесса сушки казеина;
- проведен сравнительный анализ предлагаемых сушилок и промышленной сушилки ВС-150КПИ.

Заключение

По результатам экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы:

1. В результате анализа современных конструкций сушилок и методики расчета разработаны проектные конструктивные решения конвективной ленточной сушилки, установок виброаэрокипящего и фонтанирующего слоя с комбинированным инфракрасным подводом теплоты, позволяющие повысить эффективность процесса сушки казеина.

2. Разработана физическая модель процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве.

3. Предложена иерархическая структура для моделирования и оптимизации процесса сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве.

4. Разработана структурно-параметрическая модель сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве для диагностики и прогнозирования эффективности процесса сушки;

5. Определены рациональные параметры режима сушки и оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильного аппарата.

6. Разработаны математические модели, позволяющие определить рациональные параметры режима сушки и оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильных аппаратов.

7. Исследован процесс сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве с использованием критериев подобия теплообмена.

8. Установлены основные закономерности и методы расчета параметров кинетики сушки казеина.

9. Проведены экспериментальные исследования реологических показателей сухого казеина.

10. Разработаны математические модели для решения задач распределения влажности и температуры в слоях казеина, средней влажности и температуры в

слоях казеина, влажность и температуры горячего воздуха в камере в первый и второй период сушки.

11. Предложены проектные конструктивные решения конвективной ленточной сушилки, установок виброаэрокипящего и фонтанирующего слоя с комбинированным инфракрасным подводом теплоты, позволяющие повысить эффективность процесса сушки казеина.

12. Научные и прикладные результаты исследований позволили разработать рекомендации для внедрения на действующем предприятии ООО МИП «ИЦ БиоПищеМаш» оборудование для хранения и переработки сельхозпродукции.

Список литературы

1. Акулич, П. В. Волновое движение и теплообмен дисперсной фазы в среде перегретого пара в процессах сушки / VI Минский междунар. форум по тепло- и массообмену (19–23 мая 2008 г.). – Минск, 2008. – С. 173–174.
2. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 443 с. – ISBN 978-985-08-1192-9.
3. Акулич, П. В. Теплоперенос в пористых средах при углублении зоны испарения // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2006. – № 2. – С. 76–80.
4. Акулич, П. В. Термогидродинамические процессы в технике сушки. – Минск: ИТМО НАН Беларусі, 2002. – 268 с.
5. Акулич, П. В. Технологии и техника сушки и термообработки материалов/ П. В. Акулич, В. Л. Драгун, П. С. Куц – Минск: Беларус. наука, 2006. – 190 с.
6. Антипов, С.Т. Машины и аппараты пищевых производств: учеб. для вузов / С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. Н. Остриков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2009. – Кн. 1. – 610 с. ; – Кн. 2. – 847 с. ; — Кн. 3 – 551 с.
7. Арапов, В. М. Влияние начальной влажности казеина на качество сушки/ В. М. Арапов, К.К. Полянский, Н.А. Янпольская. – ID: 20533641// Молочная промышленность 2003 г. № 12.– С. 41-42.
8. Арапов, В. М. Подготовка казеина к сушке/ В. М. Арапов, Н. А. Воронцова, К. К. Полянский.– ID: 19040523// Молочная промышленность. – 2003. – № 7.– С. 25-26.
9. Беднарская, Е. А. Процессы и аппараты пищевых производств/ Е. А. Беднарская// Сушка. Конструкции сушильных аппаратов: учеб. пособие / Е. А. Беднарская, Е. А. Мишта, П. В. Мишта ; ВолгГТУ – Волгоград, 2012. – 48 с.
10. Беляева, М. А. Иерархическая структура процесса тепловой обработки мясных изделий / М. А. Беляева //Хранение и переработка сельхозсырья. – 2004. - № 2. – С.21-22.

11. Беляева, М. А. Многокритериальная оптимизация процессов тепловой обработки мясных полуфабрикатов при ИК - энергоподводе: Специальность 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств»: диссертация доктора технических наук / М.А. Беляева - М., МГУПБ, 2009. - 525 с.

12. Беляева, М. А. Многокритериальная оптимизация тепловой обработки мясных полуфабрикатов с использованием современных электрофизических методов нагрева: монограмма / М. А. Беляева. – М.: изд-во Русайнс, 2016. – 244 с.

13. Беляева, М. А. Моделирование технико-экономических систем/ М.А. Беляева// учебное пособие / М. А. Беляева – М. : Русайнс. – 2018.–55 с.

14. Беляева, М. А. Оптимизация пищевой и биологической ценности мясных полуфабрикатов в процессе тепловой обработки с целью обеспечения населения качественными продуктами питания: монограмма / М.А. Беляева. – М.: изд-во Русайнс, 2017.–342с.

15. Беляева, М. А. Системный анализ технологий и бизнес-процессов в мясном производстве: монограмма / М. А. Беляева. – М.: изд-во РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2015. – 386 с.

16. Малази, С. А. Влияние ультразвуковой обработки на реологические и функциональные свойства пищевых продуктов/ С. А. Малази, М. А. Беляева // Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы Первой международной научно-практической конференции. (Москва, 18 октября 2018) / РЭУ им. Г.В. Плеханова. – Москва: Изд-во РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2018.– С. 268-280.

17. Малази, С. А. Влияние ультразвуковой обработки на реологические и функциональные свойства пищевых продуктов / С. А. Малази, М. А. Беляева// Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы Первой международной научно-практической конференции. (Москва, 18 октября 2018) / РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во Вест-Ост-Ферлаг Берлин, 2018. – С. 284-296.

18. Гельперин, Н. И. Основы техники псевдооживления: / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша –М.: Химия, 1967. – 664 с.

19. Гинзбург, А.С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое / А. С. Гинзбург, В. А. Резчиков. – Москва: Изд-во Пищевая промышленность, 1966. – 157 с.
20. Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов/ А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская – М.: Агропромиздат, 1990. – 287 с.
21. Гинзбург, А.С. Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов// А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская – М.: Издательство Пищевая промышленность, 1980. – С. 97-120.
22. Горбатов, А. В. Реология мясных и молочных продуктов / А. В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.
23. Горбатова, К. К. Физико-химические и биохимические основы производства молочных продуктов / К. К. Горбатова – С-Петербург.: ГИОРД, 2004, 350 с.
24. ГОСТ 32892-2014 Молоко и молочная продукция. Метод измерения активной кислотности.
25. ГОСТ 34454-2018 Продукция молочная. Определение массовой доли белка методом Кьельдаля.
26. ГОСТ 3626-47 Молоко и молочные продукты. Методы определения содержания влаги и сухого вещества.
27. ГОСТ Р ИСО 22935-2-2011 Молоко и молочные продукты. Органолептический анализ. Часть 2. Рекомендуемые методы органолептической оценки.
28. Григорьева, В. А. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент/ В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М., Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
29. Гринчик, Н. Н. Процессы переноса в пористых средах, электролитах и мембранах / Н. Н. Гринчик. – Минск: АНК ИТМО АН Беларуси, 1991. – 252 с.
30. Диткин, В. А. Справочник по операционному исчислению/ В. А. Диткин, А. П. Прудников– М.: Высш. школа. 1965. 465 с.
31. Дымар, О. В. Производство казеина на ОАО "Барановичский молочный комбинат". Опыт энергосбережения/ О. В. Дымар, А. В. Мелещеня, В. И. Ракуть. Минск : Белорусское сельское хозяйство, 2007. – С. 83-85.

32. Дымар, О. В. Энергосбережение при производстве казеина / О. В. Дымар.– Минск.: Агрэоэкономіка, 2005. – С. 49-50.

33. Забодалова, Л.А. Производство цельно-молочных продуктов и мороженого/Л.А.Забодалова // Учеб. Пособие/ Л. А. Забодалова, Т. Н. Евстигнеева.– СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ. 2013. – 304 с.

34. Ивашкин, Ю. А. Системный анализ и исследование операций в прикладной биотехнологии / Ю. А. Ивашкин – М.: МГУПБ, 2005. – 199 с. 18, – С. 37-39.

35. Ивашкин, Ю. А. Мультиагентное имитационное моделирование больших систем/Ю.А. Ивашкин// : Учебное пособие. - М. : МГУПБ, 2008, 230 с.

36. Ивашкин, Ю. А. Структурно-параметрическое моделирование инфракрасной термообработки мясных продуктов / Ю. А. Ивашкин, М. А. Беляева // Мясная индустрия, 2006. – № 10. – С. 37-39.

37. Малази, С. А. Изучение влияния сывороточных белков и условий хранения на физико-химические свойства йогурта изготовленного из сухих компонентов / С.А. Малази, М.А. Беляева// Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии: материалы Третьей Международной научно-практической конференции. (Москва, 16 ноября 2016)/ РЭУ им. Г.В.Плеханова. – Москва: Изд-во РЭУ им. Г.В.Плеханова, 2017. – С. 125-137.

38. Малази, С. А. Изучение влияния сывороточных белков и условий хранения на физико-химические свойства йогурта изготовленного из сухих компонентов / С.А. Малази, М.А. Беляева// Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии: материалы Третьей Международно научно-практической конференции.(Москва, 16 ноября 2016)/ РЭУ им. Г.В.Плеханова,.–Москва: Изд-во Вест-Ост-Ферлаг Берлин. – 2017. – С. 164-176.

39. Малази, С. А. Изучение влияния условий хранения на структурно-механические характеристики йогурта / С. А. Малази, М. А. Беляева// Инновации: перспективы, проблемы, достижения: материалы Пятой Международной научно-практической конференции (Москва, 17 мая 2017) / РЭУ им. Г. В. Плеханова.–Москва: Изд-во РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2017.– С. 181-198.

40. Малази, С. А. Изучение влияния условий хранения на структурно-механические характеристики йогурта / С. А. Малази, М. А. Беляева// Инновации: перспективы, проблемы, достижения: материалы Пятой Международной научно-практической конференции (Москва, 17 мая 2017) / РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во Вест-Ост-Ферлаг Берлин, 2017. – С. 186-203.

41. Малази, С. А. Инновационные применения инфракрасной обработки пищевых продуктов / С.А. Малази// Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы второй Международной научно-практической конференции (Москва, 17 октября 2018) / РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во Вест-Ост-Ферлаг, 2019. – С. 570-584.

42. Малази, С. А. Инновационные применения инфракрасной обработки пищевых продуктов / С. А. Малази // Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы второй Международной научно-практической конференции (Москва, 17 октября 2018) / РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2019. – С. 424-438.

43. Малази, С. А. Исследование и анализ влияния гомогенизации на процесс гелеобразования и свойства кисломолочных сгустков / С. А. Малази, М. А. Беляева // Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии: третья международная научно-практическая конференция (Москва, 16 ноября 2016) / РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во Вест-Ост-Ферлаг Берлин, 2017.– С. 213-220.

44. Куц, П.С. Исследование процесса сушки лигнина. Тепло- и массоперенос / П. С. Куц, П. В. Акулич, О. Д. Макарова, К. Г. Чижик//: Сб. науч. тр. ИТМО НАН Беларуси. – Минск, 2002. – С. 8–12.

45. Кавецкий, Г. Д. Процессы и аппараты пищевой технологии/ Г.Д. Кавецкий, В. П. Касьяненко, – М.: Колос, 2008. – 591 с.

46. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – М.: Альянс, 2005. – 753 с.

47. Компьютерные технологии оптимальных решений в переработке биосырья / Ю. А. Ивашкин // «Пища. Экология. Человек»: материалы 3-й Международной научно-технической конференции – М.: МГУПБ, 1999, с. 99-105.
48. Косой, В. Д. Инженерная реология биотехнологических сред / В. Д. Косой, Я. И. Виноградов, А. Д. Малышев. – СПб.: ГИОРД, 2005. – 648 с.
49. Косой, В. Д. Инженерная реология: пособие для лабораторных и практических занятий [Текст] / В. Д. Косой. - СПб.: ГИОРД, 2007. – 664 с.: ил. - ISBN 978-5-98879-058-7.
50. Кришер, О. Научные основы техники сушки / О. Кришер. – М: Изд-во иностр. Лит, 1961. – 539 с.
51. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М: Изд-во Атомиздат, 1979.– 79 с.
52. Лебедев, П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П. Д. Лебедев. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 320 с.
53. Лыков, А. В. Теория сушки/ А.В. Лыков. – М.: Энергия. 1968. – 472 с.
54. Лыков, А. В. Теория сушки/ А.В. Лыков. – М.: Энергия. 1973. – 472 с.
55. Лыков, А. В. Тепломассообмен/ А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 560 с.
56. Лыков, М. В. Сушка в химической промышленности/ А. В. Лыков. – М.: Химия, 1970. – 432 с.
57. Максимов, А.С. Реология пищевых продуктов: лабораторный практикум [Текст]/ А. С. Максимов, В. Я. Черных. – СПб.: ГИОРД, 2006. – 171 с.
58. Малази, С. А. Иерархическая структура анализа процесса сушки кисломолочных продуктов / С. А. Малази, М. А. Беляева. – ID: 36973719// Пищевая промышленность. – 2019. – № 1. – С. 24-27.
59. Малази, С. А. Математическая модель процесса сушки кисломолочных продуктов с использованием инфракрасного и конвективного методов нагрева / С. А. Малази, М. А. Беляева. – ID: 41326594 // Пищевая промышленность.– 2019. – № 10. – С. 89-92.

60. Малази, С. А. Моделирование теплопереноса процесса сушки казеина с учетом изменения структурно-механических свойств при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве / С. А. Малази, М. А. Беляева. – ID: 43829370 // Пищевая промышленность. – 2020. – № 8. – С. 60-63.

61. Малази, С. А. Оптимизация и аппаратурное оформление инфракрасной сушки национального кисломолочного продукта (курта) / С.А. Малази, М.А. Беляева. – ID: 30562644//. Хранение и переработка сельхозсырья. – 2017. – № 10. – С. 41-45.

62. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – с. 344.

63. Михеева, Н. С. Процессы и аппараты пищевых производств. Расчет сушильной установки / Н. С. Михеева. – М : Издательский комплекс, 2001. – 85 с.

64. Малази, С. А. Моделирование массообменного процесса сушки казеина с учетом изменения структурно-механических свойств при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве / С. А. Малази// Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы Третьей международной научно-практической конференции. (Москва, 12 ноября 2019) / РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2020. С. 153-168.

65. Малази, С. А. Моделирование массообменного процесса сушки казеина с учетом изменения структурно-механических свойств при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве /С.А. Малази//Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы Третьей международной научно-практической конференции. (Москва, 12 ноября 2019) / РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во Вест-Ост-Ферлаг, 2020. – С. 187-202.

66. Малази, С. А. Моделирование процесса сушки кисломолочных продуктов / С. А. Малази//Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы второй Международной научно-практической конференции. (Москва, 17 октября 2018) / РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2019. - С. 499-511.

67. Малази, С. А. Моделирование процесса сушки кисломолочных продуктов / С.А. Малази // Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы второй Международной научно-практической конференции. (Москва, 17 октября 2018) / РЭУ им. Г.В.Плеханова. – Москва: Изд-во Вест-Ост-Ферлаг, 2019. С. 652-664.

68. Муштаев, В. И. Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. –352 с.

69. Муштаев, В. И., Ульянов В. М. Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия, 1988. –255-352 с.

70. Натареев, О. С. Моделирование и расчет процесса сушки влажных материалов в камерной сушилке: специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» дис. ...канд.тех.наук / О. С. Натареев.- Ивново.,2016.-86 с.

71. Натареев, О. С. Теплоперенос в процессе конвективной сушки влажного материала / О. С. Натареев, Н. Р. Кокина, С. В Натареев. Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. –2015. –Т. 58, № 2.– С. 67-72.

72. Натареев, С. В. Массоперенос в процессе сушки влажного материала при конвективном подводе теплоты / С. В Натареев, О. С. Натареев, Е. Н. Венкин Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55. – № 3. – С. 104-108.

73. Натареев, С. В. Массоперенос в системе с твердым телом / С. В Натареев, О. С. Натареев, Н. Р. Кокина, Е. А. Дубкова. Теоретические основы химической технологии. – 2015. –Т. 49. № 1.– С. 74.

74. Натареев, С. В. Массоперенос в телах классических форм в аппарате полного смешения полунепрерывного действия / С. В Натареев, О. С. Натареев, А. А. Быков, Д. Е. Захаров. Журнал прикладной химии. – 2017. – Т. 90, № 2.– С. 180-186.

75. Натареев, С. В. Теплоперенос в теле сферической формы в конвективном потоке теплоносителя/ С. В Натареев, О. С. Натареев, Н. Р. Кокина. Известия

высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2014. –Т. 57, № 8. –С. 71-73.

76. Ольшанский, А. И. Исследование процесса сушки тонких материалов методом регулярного режима / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский. // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2011. – № 2. – С. 75-81.

77. Ольшанский, А. И. Исследование радиационно-конвективной сушки технических тканей критериями подобия теплообмена / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский, С.В. Жерносек // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. –2014. № 4. –С. 56-64.

78. Малази, С. А. Омический процесс нагрева - как альтернативная технология обработки пищевых продуктов / С. А. Малази//Инновации: перспективы, проблемы, достижения: материалы Шестой международной научно-практической конференции. (Москва, 28 марта 2018) / РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2018. С. 167-179.

79. Малази, С. А. Омический процесс нагрева - как альтернативная технология обработки пищевых продуктов / С. А. Малази//Инновации: перспективы, проблемы, достижения: материалы Шестой международной научно-практической конференции. (Москва, 28 марта 2018) / РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во Вест-Ост-Ферлаг, 2018. – С. 234-246.

80. Остриков, А. Н. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств: учеб. / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов, Г. В. Калашников [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Изд-во РАПП, 2009. — 408 с.

81. Остриков, А. Н. Процессы и аппараты пищевых производств: учеб. для вузов: в 2 кн. / А. Н. Остриков и [др.]; под ред. А. Н. Острикова. – СПб.: ГИОРД, 2007. – Кн. 1. – 704 с.

82. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В.М. Жидких. Л. Энергия, 1968. – 304 с.

83. Плаксин Ю. М. Процессы и аппараты пищевых производств / Ю. М. Плаксин, Н. Н. Малахов, В. А. Ларин. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 2007. – 760 с.

84. Рогов, И. А. Физические методы обработки пищевых продуктов/ И. А. Рогов, А. В. Горбатов – М.: Пищевая промышленность, 1974. –583 с.
85. Романков, П. Г. Сушка во взвешенном состоянии/ П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская – Л.: Химия,1979. – 272 с.
86. Рысин, А. П. Научные основы техники сушки пищевых продуктов в виброкипящем слое и промышленное внедрение сушильных установок: специальность 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств»: Дис. ... д-ра техн. Наук/ А. П. Рысин. – М., 1990.–51С.
87. Сажин, Б. С. Основы техники сушки/ Б. С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 20 с.
88. Малази, С. А. Системный анализ процесса инфракрасной сушки молочных продуктов / С. А. Малази, М. А. Беляева// Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии: материалы Пятой Международной научно-практической конференции. (Москва, 20 марта 2019)/ РЭУ им. Г. В. Плеханова.–Москва: Изд-во РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2019.– С. 63-72.
89. Тодес, О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем/ О. М. Тодес, О. Б. Цитович – Л.: Химия, 1981. –296 с.
90. Малази, С. А. Физические принципы и практическая значимость инфракрасного нагрева продуктов питания / С. А. Малази, М. А. Беляева// Траектории развития: материалы Первой международной научной конференции. (Москва, 20 декабря 2017)/ РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Москва: Изд-во РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2018. –С. 584-597.
91. Малази, С. А. Физические принципы и практическая значимость инфракрасного нагрева продуктов питания / С. А. Малази, М. А. Беляева // Траектории развития: материалы Первой международной научной конференции. (Москва, 20 декабря 2017)/ РЭУ им. Г. В. Плеханова. –Москва: Изд-во Вест-Ост-Ферлаг Берлин, 2018. – С. 431-443.
92. Чагин, О. В. Оборудование для сушки пищевых продуктов / О. В. Чагин, Н. Р. Кокина, В. В. Пастин ; Иван. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2007.

93. Шалыгина, А. М. Общая технология молока и молочных продуктов / А. М. Шалыгина, Л. В. Калинина. – М.: Колос, 2006. – 199 с.
94. Шаршов, В. Н. Разработка и исследование вакуумного способа сушки казеина: специальность 05.18.12 «Процессы и аппараты пищевых производств»: Автореферат дис. ...канд.тех.наук/ В. Н. Шаршов.- Воронеж.,1998.-14 с.
95. Шрайбер, А. А. Термическая обработка полидисперсных материалов в двухфазном потоке / А. А. Шрайбер, В. Д. Глянченко. – Киев: Наук. думка, 1976. – 155 с.
96. Дымар, О. В. Энергосбережение при производстве казеина / О. В. Дымар, В. С. Трофимов// Аграрная энергетика в XXI-м столетии: материалы II-й Международной научно-технической конференции. – Минск., 2002. С.145-146.
97. A.S. Mujumdar, D. Marinus-Kouris, M. Krodida, in: A.S. Mujumdar (Ed.), Handbook of Industrial Drying, CRC Press, Boca Raton, FL, 2014, pp. 139–158.
98. Abu Diak O, Bani-Jaber A, Amro B, Jones D, Andrews GP. The Manufacture and Characterization of Casein Films as Novel Tablet Coatings. Food and Bioproducts Processing. 2007; 85(3):284-290.
99. Atti, C., and Mujumdar, A.S. 2007. Infrared drying. In Handbook of Industrial Drying, 3rd ed., vol. 1: 423–437. New York: Marcel Dekker.
100. Baker, C.G.J., Khan, A.R., Ali, Y.I., and Damyar, K.,Simulation of plug flow fluidized bed dryers. Chem. Eng. Process., 45, 641–651, 2006.
101. Belyaeva M., Gazhur A., Perov V., Malazi S.A., Lukhovskaya O. Establishing an effective system for the introduction of vending technologies in the consumer market and in university catering. Lecture Notes in Networks and Systems (см. в книгах). 2020. Т. 111. С. 353-362.
102. Brito, A. B. N.; Giuliatti, M. Study of lactose crystallization in water-acetone solutions. Crystal Research and Technology, v. 42, p. 583–588, 2007.
103. Bylund, G. Tetra Pak Dairy Processing Handbook, Tetra Pak Processing Systems AB, Lund,Sweden, 1995.
104. Cabot W. The many uses for industrial (technical) casein. 2016. Access: <http://www.amcoproteins.com/> 26.11.2016, 15:00.

105. Cabot W. The many uses for industrial (technical) casein. 2016. Access: <http://www.amcoproteins.com/> 26.11.2016, 15:00.
106. Chakraverty, A. & Singh, R.P. (2014). Methods of Grain Drying. In: Post-harvest Technology and Food Process Engineering, pp. 75–81, Taylor & Francis, Boca Raton, FL.
107. Crowley, S.V.; Desautel, B.; Gazi, I.; Kelly, A.L.; Huppertz, T.; O'Mahony, J.A. Rehydration characteristics of milk protein concentrate powders. *J. Food Eng.* 2015, 149, 105–113.
108. Crowley, S.V.; Kelly, A.L.; Schuck, P.; Jeantet, R.; O'Mahony, J.A. Rehydration and solubility characteristics of high-protein dairy powders. In *Advanced Dairy Chemistry. Volume 1B: Proteins: Applied aspects*, 4th ed.; McSweeney, P.L.H., O'Mahony, J.A., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2016; pp. 99–131.
109. Cruz, M.A.A., Passos, M.L., and Ferreira, W.R., Final drying of whole milk powder in vibrated-fluidized beds, *Drying Technol.*, 23, 2021–2037, 2005.
110. Daleffe, R.V., Ferreira, M.C., and Freire, J.T., Drying of pastes in vibro-fluidized beds: Effects of the amplitude and frequency of vibration, *Drying Technol.*, 23, 1765–1781, 2005.
111. Daud, W.R.W. (2014). Drum dryers. In: *Handbook of Industrial Drying*, 4th edn (ed. Mujumdar, A.S.), pp. 249–257, CRC Press, Marcel Dekker, New York.
112. Diamante, L.M. Casein drying: A thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Food Technology/ Lemuel M. Diamante.- Massey University., 1991.-25 c.
113. Dickinson E. Structure formation in casein-based gels, foams and emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*. 2006; 288:3-11.
114. Dumoulin, E., 2008. From powder end use properties to process engineering. In: Gutiérrez-Lo'pez, G.F., Barbosa-Ca'novas, G.V., Welti-Chanes, J., Parada-Arias, E. (Eds.), *Food Engineering Integrated Approach*. Springer, New York.
115. Eshpari, H.; Tong, P.S.; Corredig, M. Changes in the physical properties, solubility, and heat stability of milk protein concentrates prepared from partially acidified milk. *J. Dairy Sci.* 2014, 97, 7394–7401.

116. Fox PF. Milk: an overview, In: milk proteins: from expression to food, ISBN: 78-0-12-374039-7, Elsevier Ltd, London, England. 2009, 1-54.
117. Frisher H, Meisel H, and Schlimme E (2011) OPA method modified by use of N, N-dimethyl-2-mercaptoethylammonium chloride as thiol components. *Frese-nius' Journal of Analytical Chemistry* 330: 631–633.
118. Fyfe, K.N.; Kravchuk, O.; Le, T.; Deeth, H.C.; Nguyen, A.V.; Bhandari, B. Storage induced changes to high protein powders: Influence on surface properties and solubility. *J. Sci. Food Agric.* 2011, 9, 2566–2575.
119. Ganzle, M. G.; Haase, G.; Jelen, P. Lactose: crystallization, hydrolysis and value-added derivatives. *International Dairy Journal*, v. 18, p. 685–694, 2008.
120. Gaygadzhiev Z, Massel V, Alexander VM, Corredig M. Addition of sodium caseinate to skim milk inhibits rennet-induced aggregation of casein micelles. *Food Hydrocolloids*. 2012; 26:405-11.
121. Grunewald, G., Westhoff, B., and Kind, M., Fluidized bed spray granulation: Nucleation studies with steady-state experiments, *Drying Technol.*, 28, 349–360, 2010.
122. Guo C, Campbell BE, Chen K, Lenhoff AM, Velev OD. Casein precipitation equilibria in the presence of calcium ions and phosphates. *Colloids and Surfaces B: Bio-interfaces*. 2003; 29:297-307.
123. Gupta VK. Developments in the manufacturing technology of casein. *Technological advances in the utilization of dairy by products*, 22nd Short Course NDRI, India. 2008.
124. Hallen E. Coagulation properties of milk. Doctoral thesis, Department of Food Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Swedish. 2008.
125. Herzallah, S.M, Humeid,M.A. and Al-Ismail, K.M. (2005) Effect of heating and processing methods of milk and dairy products on conjugated linoleic acid and trans fatty acid isomer content. *Journal of Dairy Science*,
126. Horne DS. Casein micelle structure and stability, In: *Milk proteins: From expression to food*, ISBN: 978-0-12-374039-7, Elsevier Ltd, London, England. 2009, 133-163.

127. Horne DS. Casein micelle structure and stability, In: Milk proteins: From expression to food, ISBN: 978-0-12-374039-7, Elsevier Ltd, London, England. 2009, 133-163.
128. Horne DS. Casein micelle structure: models and muddles. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. 2006; 11:148-53.
129. Horne DS. Casein micelle structure: models and muddles. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. 2006; 11:148-53.
130. Huppertz T, de Kruif CG. Structure and stability of nanogel particles prepared by internal cross-linking of casein micelles. *International Dairy Journal*. 2008; 18:556-565.
131. J.G. Brennen, A.S. Grandiso, *Food Processing Handbook*, vol. 1, Wiley-VCH Verlag, Weinheim (Germany), 2012.
132. Jacob M, Jaros D, Rohm H. Recent advances in milk clotting enzymes. *International Journal of Dairy Technology*. 2010; 63:1-18.
133. Joshi V. et al., *Dairy products technology (dairy technology)*, student handbook for class XII central board of secondary education, India. 2013.
134. Kelly, G.M.; O'Mahony, J.A.; Kelly, A.L.; Huppertz, T.; Kennedy, D.; O'Callaghan, D.J. Influence of protein concentration on surface composition and physico-chemical properties of spray dried milk protein concentrate powders. *Int. Dairy J*. 2015, 51, 34–40.
135. Krishnamurthy, K., Khuarana, H.K., Jun, S., Irudayaraj, J., and Demirci, A. 2008. Infrared heat in food processing, an overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 7: 1–12.
136. Le, T.T.; Bhandari, B.; Deeth, H.C. Chemical and physical changes in milk protein concentrate (MPC80) powder during storage. *J. Agric. Food Chem*. 2011, 59, 5465–5473.
137. Livney YD. Milk proteins as vehicles for bioactives. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. 2010; 15:73-83.
138. Metin M. *Dairy Technology, Composition and processing of milk*, 6th edn. Ege University Press, Turkey. (Turkish). 2005, 134-135.

139. Mimouni, A.; Deeth, H.C.; Whittaker, A.K.; Gidley, M.J.; Bhandari, B.R. Rehydration process of milk protein concentrate powder monitored by static light scattering. *Food Hydrocoll.* 2009, 23, 1958–1965.
140. Mujumdar, A.S., Spouted bed technology—A brief review, in *Drying* 85, Mujumdar, A.S., Ed., Hemisphere Publishing, New York, 1985, pp. 151–157.
141. Mulvihill, D.M. , and Ennis , M.P. 2003 . “Functional Milk Proteins: Production and Utilisation. ” *Advanced Dairy Chemistry. Volume 1: Proteins*, 3rd ed . Fox, P.F. , and McSweeney , P.L.H. (eds). Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York . 1175 – 1228.
142. Neha A, Tarun G, Ajay B. Review on casein production and casein based nano-formulations. *International Research Journal of Farmacy (IRJP)*. 2012; 3(1):1-5.
143. O’Sullivan MM, Singh H, Munro PA, Mulvihill DM. The effect of cooking and washing temperature during pilot-scale rennet casein manufacture on casein hydration characteristics in disodium orthophosphate solution. *International Journal of Dairy Technology*. 2002; 55:18-26.
144. Puspasari, I., Talib, M.Z.M., Daud, W.R.W., and Tasirin, S.M., Drying kinetics of oil palm frond particles in an agitated fluidized bed dryer, *Drying Technol.*, 30, 619–630, 2012.
145. Rahman, M.S. *Handbook of Food Preservation*, 2nd ed, CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
146. Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., Datta, A.K. *Engineering Properties of Foods*, 3rd ed, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
147. Ronsse, F., Pieters, J.G., and Dewettinck, K., Numerical spray model of the fluidized bed coating process, *Drying Technol.*, 25, 1491–1514, 2007.
148. Sahu , A. , Kasoju , N. , and Bora , U. 2008 . “ Fluorescence study of the curcumin - casein micelle complexation and its application as a drug nanocarrier to cancer cells . ” *Biomacromolecules* 9 : 2905 – 2912 .
149. Sarıküş G. The production of edible film containing antimicrobials and its effect on microbial inactivation during kasar cheese storage. MSc thesis, Süleyman Demirel University, Institute of Science, Turkey. 2006.

150. Sauer, A.; Doehner, I.; Moraru, C.I. Steady shear rheological properties of micellar casein concentrates obtained by membrane filtration as a function of shear rate, concentration and temperature. *J. Dairy Sci.* 2012, 95, 5569–5579.
151. Schuck, P., Davenel, A., Mariette, F., Briard, V., Méjean, S., and Piot, M. 2002. “Rehydration of casein powders: effect of added mineral salts and salt addition methods on water transfer.” *International Dairy Journal* 12: 51 – 57.
152. Schuck, P.; Le Floch-Fouéré, C.; Jeantet, R. Changes in functional properties of milk protein powders: Effects of vacuum concentration and drying. *Dry. Technol.* 2013, 31, 13–14.
153. Schuck, P.; Mejean, S.; Dolivet, A.; Gaiani, C.; Banon, S.; Scher, J.; Jeantet, R. Water transfer during rehydration of micellar casein powders. *Lait* 2007, 87, 425–432.
154. Semyonov, D., Ramon, O., Kovacs, A., Friedlander, L., and Shimoni, E., Air-suspension fluidized-bed microencapsulation of probiotics, *Drying Technol.*, 30, 1918–1930, 2012.
155. Sadek C, Pauchard L, Schuck P, Fallourd Y, Pradeau N, Le Floch-Fouéré C, Jeantet R. 2015. Mechanical properties of milk protein skin layers after drying: understanding the mechanisms of particle formation from whey protein isolate and native phosphocaseinate. *Food Hydrocoll* 48: 8– 16.
156. Shima H, Tanimoto M. Quantifying thermally induced flowability of rennet cheese curds. *International Journal of Food Properties*. 2015; 18:2277-2283.
157. Sikand, V.; Tong, P.S.; Roy, S.; Rodriguez-Saona, L.E.; Murray, B.A. Solubility of commercial milk protein concentrates and milk protein isolates. *J. Dairy Sci.* 2011, 94, 6194–6202.
158. Singh, R.P. & Heldman, D.R. (2014). Dehydration. In: *Introduction to Food Engineering*, 5th edn, pp. 675–708, Elsevier Inc.
159. Singh, R.P., Heldman, D.R. *Introduction to Food Engineering*, 4th ed, Academic Press, New York, 2008.

160. Skanderby, M.; Westergaard, V.; Partridge, A.; Muir, D.D. Dried milk products. In *Dairy Powders and Concentrated Products*, 1st ed.; Tamime, A.Y., Ed.; Wiley-Blackwell: West Sussex, UK, 2009; pp. 180–234.

161. Southward CR, Aird. Casein, Chapter. 1978, 20. Access: <http://www.dairyprocessinghandbook.com/chapter/casein> 19.11.2016, 15:30.

162. Southward CR. Casein products. Consumer and Applications Science Section, New Zealand Dairy Research Institute. 2016. Access: <http://Nzic.org.nz/ChemProcess/dairy/> 19.11.2016, 15:00.

163. Stathopoulos, C., and O' Kennedy, B.T. 2008. "A rheological evaluation of concentrated casein systems as replacement for gluten: calcium effects." *International Journal of Dairy Technology* 61 : 397 – 402

164. Stathopoulos CE. Dairy - based ingredients, In: *Gluten-free cereal products and beverages*, ISBN: 97801237397, Elsevier Ltd, 217-236, London, England. 2008.

165. Swaisgood, H.E. 2003. "Chemistry of the Caseins." *Advanced Dairy Chemistry. Vol. 1: Proteins*. Fox, P.F., and McSweeney, P.L.H. Elsevier Applied Science, London. 139 – 201.

166. Tamime, A. (2009) *Milk Processing and Quality Management*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.

167. Tewari, G. and Juneja, V.K. (eds) (2007) *Advances in Thermal and Non-thermal Food Preservation*. Blackwell Publishing, IA.

168. Toledo, R.T. *Fundamentals of Food Process Engineering*, 3rd ed, Springer, New York, 2006.

169. Üçüncü M. *Dairy and dairy products technology*, Ege University Press, Turkey. (Turkish). 2005.

170. Vicente, A. and Castro, I.A. (2007) Novel thermal processing technologies, in *Advances in Thermal and Non-thermal Food Preservation* (eds G. Tewari and V.K. Juneja). Blackwell Publishing, IA, pp. 99–130.

171. Walstra, P., Wouters, J.T.M., Guerts, T.J. *Dairy Science and Technology*, 2nd ed, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.

172. Wang J, Su J, Jia F, and Jin H (2013) Characterization of casein hydrolysates derived from enzymatic hydrolysis. *Chemistry Central Journal* 7: 62–66.
173. Whiteley P, Shattock P, Knivsberg AM, et al. (2013) Gluten- and casein-free dietary intervention for autism spectrum conditions. *Frontiers in Human Neuroscience* 6: 344–350.
174. Yada, R.Y. *Proteins in Food Processing*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2004.
175. Zegota H, Malolepszy B. The decontamination of industrial casein and milk powder by irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 2008; 77:1108-1111.

Приложение А
(обязательное)
Описание и анализ сушки казеин

Таблица А.1

Уровни иерархии	Структурные элементы	Процессы	Целевая функция и вербальное моделирование процессов.
1. Технологическая среда.	Сушильный аппарат и продукт (казеин).	Процесс тепло-массообмена	Описание движущих сил процессов тепло-влагообмена.
2. Сушильный шкаф	Нагревательные инфракрасные - нагреватели, конвекция горячим воздухом, конструкция шкафа и продукт(казеин).	Процесс тепло-массообмена	Внешний теплообмен между образцом и нагревательными элементами конструкции.
3. Сушильный объект(продукт).	Толщина слоя - элементарный выделенный объем.	-Процесс теплообмен: (Излучение, теплопроводность) -Процесс массообмен: (испарение, конденсация, диффузия, массоперенос) - Фазовые процессы: (твердая- жидкая-газообразная (пар))	Описание температурных полей.
4. Слой или ячейка (элементарный выделенный объем).	Биохимический состав: влага творожного сгустка; массовая доля жира; молочный белок- казеин; сывороточный белок; молочные закваски; ферменты; минеральные вещества; углеводы (лактоза); -хлорид кальция $CaCl_2$.	-Тепло-массообменные процессы; - Фазовые процессы между частями продукта (зерновыми творожными образованиями и зерновыми шариками казеина)	-Интенсивность теплоотдачи на границе, - Массоотдачи верхнего слоя в среду рабочей камеры, -Испарение влаги с поверхностных слоев, -Внутренний тепломассоперенос.
5. Влага казеина	-Влага смачивания, находящаяся на поверхности творожных зерен и макропорах (свободная); -Механически связанная влага в	-Биохимические процессы; -Тепло-массообменные процессы; -Фазовые процессы между частями продукта;	-Изменение структурно-механических свойств; -Снижение водосвязывающей способности, обезвоживания поверхностных

Уровни иерархии	Структурные элементы	Процессы	Целевая функция и вербальное моделирование процессов.
	<p>макрокапиллярах; -соматически удерживаемая влага в сетке геля; -Адсорбционно связанная влага, удерживается молекулярным силовым полем на поверхности раздела фаз (коллоидных частиц с окружающей средой).</p>	<p>-Испарение влаги с поверхностных слоев, внутренний тепломассоперенос; -Физико-химические процессы: (разрушение адсорбционной и осмотической связей).</p>	<p>слоев; потери массы; -Влага выделяется из зерна, просачиваясь через капилляры на его поверхности.</p>
<p>6. Соединительные полипептиды, кальций, казеина (<i>αs</i>, <i>β</i>, <i>κ</i> и <i>κ</i>-казеина)</p>	<p>-Антигипертензивные пептиды в казеине (казеокинины) в частности <i>αs51</i>-казокинин-5 (<i>Фен-Фен-Вал-Ала-Про</i>) и <i>β</i>-казокинин-7 (<i>Ала-Вал-Про-Тир-Глн-Арг</i>)</p>	<p>-Биохимические процессы.</p>	<p>-Минимизация потерь аминокислоты; -Часть белков и свободных аминокислот вступает во взаимодействие с лактозой, частичная реакция <i>Майяра</i>.</p>
<p>1-Фосфолипиды; -Стерины (стеролы); -Летучие жирные кислоты; -Свободные жирные кислоты; -Минеральные вещества;</p>	<p>+1,3-диацилглицерины; Моно +1,2-диацилглицерины. -Триацилглицерины, стериды + углеводороды, Муравьиной; уксусной; пропионовой; и масляной, Кальций, фосфор, калий, магний, натрий, железо.</p>	<p>Биохимические процессы.</p>	<p>-Повышение степени дисперсности жировой фазы; -Минимизация потерь макро и микро-элементного составов; -Изменение соотношения между катионами и анионами, часть фосфорнокислых солей кальция переходит в нерастворимое состояние; -Выпадение фосфата кальция</p>

Приложение Б
(обязательное)

Качественные показатели казеина

Таблица 1.Б – Качественные показатели казеина при комбинированной инфракрасной и конвективной сушки

Наименование показателя	пример	Характеристика	Органолептическая оценка(балл)
Вкус и запах	$t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{уз}=2,02$ кВт/м ²	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов.	4.7
	$t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{уз} =3,42$ кВт/м ² ;	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов	4.5
	$t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{уз} =2,88$ кВт/м ² ;	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов.	4.2
	$t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{уз} =3,42$ кВт/м ² .	Слабо- пригорелый	4
	$t_3=140\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{уз} =3,97$ кВт/м ² ;	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов	4.5
	$t_3=140\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{уз} =2,88$ кВт/м ² ;	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов	4.5
	$t_3=140\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{уз} =2,02$ кВт/м ² ;	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов	4.4
	$t_3=140\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{уз} =2,02$ кВт/м ² .	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов	4.4
	$t_3=160\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{уз} =3,42$ кВт/м ² ;	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов	4.2
	$t_3=160\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{уз} =2,02$ кВт/м ² ;	Слабо- пригорелый	4
	$t_3=160\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{уз} =3,42$ кВт/м ² ;	Слабо выраженный кислый, без посторонних привкусов и запахов	4.3
	$t_3=160\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{уз} =2,88$ кВт/м ² .	Слабо - пригорелый	4

Наименование показателя	пример	Характеристика	Органолептическая оценка(балл)
Вкус и запах	$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м ² ;	Слабо - пригорелый	4
	$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м ² ;	Слабо - пригорелый	4
	$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м ² ;	Слабо - пригорелый	4
	$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м ² .	Слабо - пригорелый	4
Цвет	$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{uz}=2,02$ кВт/м ²	Белый или с кремовым оттенком, равномерный по всей массе	4.5
	$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м ² ;	Белый или с кремовым оттенком, равномерный по всей массе	4.5
	$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м ² ;	Кремовый, с небольшим количеством слабо коричневых гранул	4.3
	$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м ² .	Кремовый, с небольшим количеством слабо коричневых гранул	4.1
	$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м ² ;	Белый или с кремовым оттенком, равномерный по всей массе	4.5
	$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м ² ;	Белый или с кремовым оттенком, равномерный по всей массе	4.5
	$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м ² ;	Белый или с кремовым оттенком, равномерный по всей массе	4.4
	$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м ² .	Белый или с кремовым оттенком, равномерный по всей массе	4.4
	$t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м ² ;	Кремовый, с небольшим количеством слабо коричневых гранул	4.1
	$t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м ² ;	Кремовый, с небольшим количеством слабо коричневых гранул	4
	$t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м ² ;	Белый или с кремовым оттенком, равномерный по всей массе	4.4

Наименование показателя	пример	Характеристика	Органолептическая оценка(балл)
Цвет	$t_3=160^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м ² .	Кремовый с небольшим количеством слабо коричневых гранул	4.2
	$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м ² ;	Кремовый с небольшим количеством слабо коричневых гранул	4
	$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м ² ;	Кремовый с небольшим количеством слабо коричневых гранул	4
	$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м ² ;	Кремовый с небольшим количеством слабо коричневых гранул	4
	$t_3=180^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м ² .	Кремовый с небольшим количеством слабо коричневых гранул	4
	$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м ²	Кремовый с небольшим количеством слабо коричневых гранул	4
Консистенция	$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м ²	Сухие гранулы с незначительным количеством сухого порошка	4.8
	$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы с незначительным количеством сухого порошка	4.6
	$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы с незначительным количеством сухого порошка	4.4
	$t_3=100^\circ\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{uz} = 3,42$ кВт/м ² .	Сухие гранулы	4.1
	$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{uz} = 3,97$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы с незначительным количеством сухого порошка	4.6
	$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{uz} = 2,88$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы с незначительным количеством сухого порошка	4.6
	$t_3=140^\circ\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{uz} = 2,02$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы с незначительным количеством сухого порошка	4.5

Наименование показателя	пример	Характеристика	Органолептическая оценка(балл)
Консистенция	$t_3=140^{\circ}\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{уз} = 2,02$ кВт/м ² .	Сухие гранулы с незначительным количеством сухого порошка	4.4
	$t_3=160^{\circ}\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{уз} = 3,42$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы	4.1
	$t_3=160^{\circ}\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{уз} = 2,02$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы	4
	$t_3=160^{\circ}\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{уз} = 3,42$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы с незначительным количеством сухого порошка	4.4
	$t_3=160^{\circ}\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{уз} = 2,88$ кВт/м ² .	Сухие гранулы	4
	$t_3=180^{\circ}\text{C}$, $h = 10$ см, $q_{уз} = 2,88$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы	4
	$t_3=180^{\circ}\text{C}$, $h = 12$ см, $q_{уз} = 3,97$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы	4
	$t_3=180^{\circ}\text{C}$, $h = 15$ см, $q_{уз} = 3,97$ кВт/м ² ;	Сухие гранулы	4
	$t_3=180^{\circ}\text{C}$, $h = 20$ см, $q_{уз} = 3,97$ кВт/м ² .	Сухие гранулы	4

ГОСТ 31689-2012 Казеин. Технические условия

Пищевой и технический казеин по органолептическим и физическим показателям должен соответствовать требованиям, указанным в таблицах Б.2 и Б.3.

Таблица Б.2 – Органолептические и физические показатели казеина

Наименование показателя	Норма для пищевого казеина	
	кислотного	сычужного
Запах	Характерный для казеина. Не допускается сильно выраженного неприятного запаха	
Внешний вид	Сыпучий порошок. Допускается наличие комочков, рассыпающихся при механическом воздействии	
Наименование показателя	Норма для пищевого казеина	
Размер частиц, мм, не более	0,25	0,55
Цвет	От светло-желтого до желтого, однородный по всей массе	От светло-желтого до желтого или кремового, однородный по всей массе

Наименование показателя	Норма для пищевого казеина	
	кислотного	сычужного
Пригорелые частицы (диск)	Б	Б
Чистота (группа)	Не ниже группы 2	Не ниже группы 2. Наличие посторонних примесей не допускается

Таблица Б.3 – Органолептические и физические показатели казеина

Наименование показателя	Норма для технического казеина		
	кислотного		сычужного в зерне
	в зерне	молотого	
Внешний вид	Сухое плотное или пористое зерно любой формы	Сыпучий порошок. Допускается наличие комочков, рассыпающихся при механическом воздействии	Сухое плотное или пористое зерно любой формы
Размеры зерна, мм, не более	В максимальном поперечном разрезе – 10	0,55	В максимальном поперечном разрезе - 10
Цвет	От светло-желтого до желтого, однородный по всей массе. Допускается не более 3% пригорелых частиц	От светло-кремового до светло-желтого, однородный по всей массе	Светло-кремовый или от светло-желтого до желтого, однородный по всей массе. Допускается не более 1% пригорелых зерен
Чистота	Не ниже группы 2	Не ниже группы 2	Не ниже группы 2. Наличие посторонних примесей не допускается

По химическим показателям казеин должен соответствовать требованиям, указанным в таблице Б.4

Таблица Б.4 – Органолептические и физические показатели казеина

Наименование показателя	Норма для казеина				
	пищевого		технического		
	кислотного	сычужного	кислотного		сычужного в зерне
			в зерне	молотого	
Массовая доля влаги, %, не более	12,0				
Массовая доля жира, %, не более	1,5	2,0	2,0		2,5
Массовая доля жира в сухом веществе, %, не более	1,7	2,3	2,3		2,8
Массовая доля белка, %, не менее	90,0	84,0	82,0	84,0	80,0
Массовая доля золы, %, не менее	–	7,0	–	–	8,5
Массовая доля золы (включая), %, не более	2,5	–	4,0	3,0	–
Массовая доля лактозы, %, не более	1,0		–		
Свободная кислотность, °Т, не более	80,0	60,0	150,0	90,0	120,0
Свободная кислотность - объем раствора $\text{NaOH}[\text{c}(\text{NaOH}) = 0,1$ моль/дм ³] на 1 г сухого вещества, см, не более	1,02	0,94	1,70	1,02	1,45
Индекс растворимости - объем осадка на 1 г казеина, см, не более	0,4	1,2	0,6	0,4	1,6

Таблица Б.5 – Показатели разного вида казеина

	Кислотный	Сычужный	Казеинат натрия	Казеинат кальция
Белок, %	96,4	90,2	95,0	94,8
Зола, %	2,0	8,8	3,7	4,0
Лактоза, %	0,1	0,1	0,1	0,1
Жир, %	1,5	0,9	1,1	1,1
Кальций, %	–	3,0	0,1	1,3–1,6
Кислотность, рН	4,9	7,5	6,5–6,9	6,8–7,0

Таблица Б.6 – Состав цельного и обезжиренного молока

Состав молока	Содержание компонентов, %
	Цельное молоко
Вода	86,8-88,3
Белки (N×6,37)	3,08-3,70
Жир	3,60-3,88
Лактоза	4,50-4,92
Соли	0,67-0,81

Таблица Б.7 – Критерии и числа подобия

Число	Обозначение и выражение	Основной физический смысл
Нуссельта (теплообменное)	$Nu_r = \frac{\alpha l}{\lambda}$	Характеризует соотношение между интенсивностью теплоотдачи и теплопроводностью в пограничном слое
Нуссельта (массообменное число, называют также числом Шервуда Sh)	$Nu_m = \frac{\beta l}{k}$	Характеризует соотношение между интенсивностью массоотдачи и диффузией влаги (массопроводностью) в пограничном слое
Гухмана	$\frac{T_c - T_{m.m}}{T_c}$	Характеризует потенциальные возможности нагретого газа как сушильного агента (влияние массообмена на теплообмен)
Рейнольдса	$Re = \frac{\nu l}{\nu}$	Характеризует гидродинамический режим течения потока, выражая соотношение в потоке сил инерции и молекулярного трения

Примечание: T_c и T_m – абсолютная температура парогазовой смеси по сухому; ν – скорость движения жидкости, м/с; l – определяющий размер, м; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Приложение В
(справочное)
Патент на изобретения



Приложение Г (справочное)

Акт о внедрении диссертационной работы



БиоПищеМаш
ИНЖЕНЕРИНГОВЫЙ ЦЕНТР

ООО МИП «ИЦ БиоПищеМаш» ИНН/КПП 7705056217/ 770501001
115093, Москва, ул. Лосиновская, д. 35, корп. 7. | WWW.IC-BPM.RU
8 (916) 090-05-74, 8 (915) 367-42-30 | ic-bpm@ya.ru, bpm@ic-bpm.ru
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬХОЗПРОДУКЦИИ

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Малази Самуэль Али

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научных исследований Малази Самуэля Али, выполненные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной моделированию комбинированной конвективной и инфракрасной сушки казеина с учетом изменений тепломассообмена и реологических свойств, приняты к использованию на предприятии ООО МИП «ИЦ БиоПищеМаш».

Результаты исследований Малази Самуэля Али актуальны, представляют практический интерес для эффективного внедрения на предприятиях молочной промышленности.

Генеральный директор



А.И. Щипунов