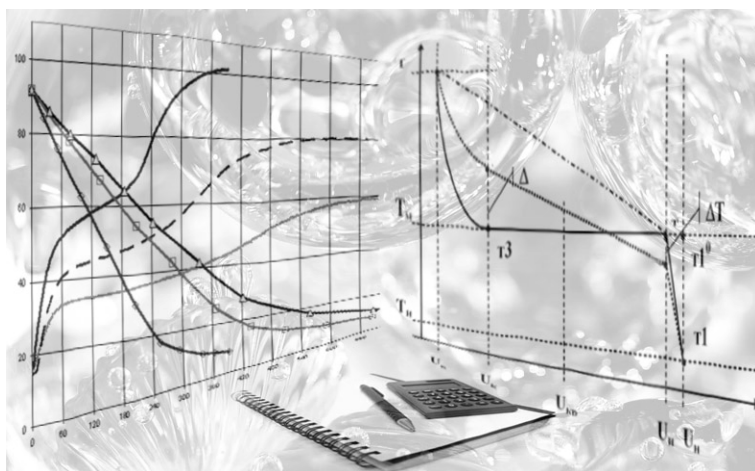


МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ
А. Н. ПАХОМОВ, Н. Ц. ГАТАПОВА, Ю. В. ПАХОМОВА

А. Н. ПАХОМОВ, Н. Ц. ГАТАПОВА, Ю. В. ПАХОМОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ
ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ
НА ПОДЛОЖКАХ**

*Рекомендовано Научно-техническим советом университета
в качестве монографии для научных и инженерно-технических
работников химической, пищевой и других отраслей промышленности*



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2016

УДК 66.047
ББК Л113.6-1
П21

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,
заместитель директора по научной работе ГНУ ВНИИТиН
Россельхозакадемии
С. А. Нагорнов

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ТГТУ»
К. В. Брянкин

Пахомов, А. Н.

П21 Моделирование и расчет кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках : монография для научных и инженерно-технических работников химической, пищевой и других отраслей промышленности / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гагапова, Ю. В. Пахомова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 160 с. – 500 экз.
ISBN 978-5-8265-1672-0

Изложены подходы к моделированию процесса сушки, основанные на предлагаемой авторами классификации типов кинетических кривых, получаемых при сушке жидких дисперсных продуктов на подложках. Описаны особенности механизма и кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках, склонных к структурообразованию. Представлена модель прогнозирования типа кинетической кривой, основанная на выделенных особенностях термограмм сушки. Даны основные модели и алгоритмы расчета для различных режимов сушки. Приведена инженерная методика расчета кинетики сушки.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников химической, пищевой и других отраслей промышленности. Будет полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в области процессов и аппаратов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.

УДК 66.047
ББК Л113.6-1

ISBN 978-5-8265-1672-0 © Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ СУШКИ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ	7
1.1. Продукты, склонные к структурообразованию в процессе сушки	7
1.2. Наблюдаемые в процессе сушки явления структурообразования	13
1.2.1. Формирование поверхностной пленки	13
1.2.2. Изменение формы поверхности	22
1.2.3. Структура поверхности пленки и сухого остатка	25
1.3. Современные подходы к исследованию процессов сушки продуктов, склонных к структурообразованию	32
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА	39
2.1. Экспериментальные установки и методы исследования	39
2.2. Теплофизические свойства и структурные характеристики жидких дисперсных продуктов	57
3. КЛАССИФИКАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ СУШКИ	75
3.1. Классификации материалов как объектов сушки и кинетических кривых	75
3.2. Возможности прогнозирования типа кинетической кривой ...	87
4. МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТИПА КИНЕТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ	89
4.1. Особенности кинетических кривых, наблюдаемых при сушке жидких дисперсных продуктов, склонных к структурообразованию	89
4.2. Основные положения	96
4.2.1. Критерий оценки возможности структурообразования	97
4.2.2. Модель для мягких режимов сушки	98
4.2.3. Модель для жестких режимов сушки	105
4.3. Результаты прогноза типа кинетической кривой в различных условиях	111

5. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА КИНЕТИКИ СУШКИ	114
5.1. Виды температурно-влажностных зависимостей	114
5.2. Расчет кинетики сушки на базе температурно-влажностных зависимостей	119
5.2.1. Основные зависимости, используемые для расчета опорных точек температурно-влажностных зависимостей	120
5.2.2. Алгоритм расчета кинетики сушки	123
5.3. Результаты расчета кинетики сушки	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	132

ВВЕДЕНИЕ

Сушка жидких дисперсных продуктов широко распространена в промышленности. Сушке подвергаются как продукты синтетического происхождения, так и природного. Наиболее распространенным по своей структуре типом высушиваемых продуктов являются жидкие дисперсные системы. Это, например, продукты химического синтеза, красители, пластификаторы, медицинские препараты, послеспиртовая барда, удобрения и т.п. Эти продукты высушивают как на подложках (искусственных – инертные тела, лента, несущая основа и т.п. и естественно сформировавшихся – субстрат, затравка высушиваемого продукта), так и без подложек во взвешенном в сушильном агенте состоянии.

Процесс сушки жидких дисперсных продуктов весьма энергоемок. Энергопотребление в процессе сушки определяется свойствами продукта, выбранным режимом сушки и кинетикой процесса (кинетическими особенностями). При это главную роль играет кинетика сушки. Поэтому моделирование и расчет кинетики процесса являются весьма актуальной задачей, имеющей важное теоретическое и прикладное значения.

В ходе исследований процессов сушки жидких дисперсных продуктов, пропиточных составов (клеев и латексов) и др. под руководством проф. В. И. Коновалова [81 – 119, 126, 129, 181 – 183] были обнаружены явления поверхностного и объемного структурообразования, оказывающие лимитирующее действие на кинетику сушки исследованных продуктов. Например, при сушке жидкой послеспиртовой барды (влажностью до 92%) наблюдалось явление формирования пленки на поверхности и соответствующее изменение характера термограммы в первом периоде [120, 121, 182, 183]. Для аналогичной по влажности мясо-костной жидкости подобное явление наблюдалось только после упаривания исходной жидкости до определенной влажности [181].

Классификации типов кинетических кривых для капиллярно-пористых тел известны [1, 7, 8, 13, 30, 80]. Однако, как показал анализ публикаций и наши исследования, такие классификации не всегда оправданы при сушке жидких дисперсных продуктов, склонных к структурообразованию [125, 182, 183]. Под руководством проф. В. И. Коновалова была разработана основа классификации типов кинетических кривых и их особенностей [97, 103 – 105, 111, 181 – 185], формирующихся при сушке жидких дисперсных продуктов.

Одной из важнейших задач, возникающих при моделировании процесса сушки, является возможность прогноза типа кинетической кривой (особенно для новых продуктов, экспериментальное исследование которых или не проводилось, или сопряжено с рядом трудностей (например, высокая цена продукта или его токсичность, пожаро- и взрывоопасность)).

В монографии предложена прогностическая модель, позволяющая расчетным путем определить тип кинетической кривой.

На протяжении ряда лет в школе проф. В. И. Коновалова разрабатывались различные методы расчета кинетики сушки. В представленной монографии дается описание методики расчета кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках с учетом явлений структурообразования [122, 123, 130 – 132, 140, 181 – 185].

1. ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ СУШКИ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ

Как отмечалось выше, в исследованиях, проводимых научной школой проф. В. И. Коновалова, часто наблюдались эффекты поверхностного и объемного структурообразования, оказывающего лимитирующее влияние на кинетику сушки. Авторами были проведены исследования кинетики сушки разнообразных жидких дисперсных продуктов как синтетического, так и природного происхождения, в частности: мясо-костной жидкости, кукурузной жидкости, белкового концентрата, растворов желатина, поваренной соли, крахмала, резиновых клеев, гамма-кислоты, Р-соли, различных диспергаторов, жидкого пластификатора бетона, послеспиртовой барды [100 – 126, 128 – 185]. При этом выявлено, что сходные по концентрации и основным теплофизическим свойствам, используемым в расчетах, продукты сохнут по-разному. Кроме того, при одинаковых условиях проведения процесса могут формироваться разные кинетические кривые. Выявлено, что формирование определенного типа кинетической кривой связано с поверхностным и/или объемным структурообразованием в процессе сушки.

Для определения факторов, влияющих на характер процесса сушки, рассмотрим наиболее характерные продукты, склонные в той или иной мере к структурообразованию.

1.1. ПРОДУКТЫ, СКЛОННЫЕ К СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЮ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Жидкая послеспиртовая барда

В процессе производства этилового спирта вторичным продуктом является жидкая послеспиртовая барда. Послеспиртовая жидкая барда – жидкость светло-желтого цвета (для зерновой и кукурузной барды, вообще, цвет исходной барды зависит от исходного сырья, процесса брожения и режима работы бражной колонны) с концентрацией твердой фазы не более 8...10% (масс.). Жидкая барда на открытом воздухе при температуре 20 °С теряет свои товарные качества примерно за сутки. При этом послеспиртовая барда быстро подвергается микробной порче за счет развития сапрофитной микрофлоры, ее физико-химический состав и, соответственно, физиологические свойства непредсказуемо изменяются. При доступе воздуха и без регулярного

перемешивания более легкие фракции на поверхности могут повреждаться плесневыми грибами.

Жидкая барда обладает высокой питательной ценностью (в барде содержится высокое количество белка зерна). Ранее барда реализовывалась животноводческим хозяйствам на корм скоту или отправлялась на поля фильтрации. Но такой способ утилизации крайне не эффективен. Например, при мощности спиртзавода в 3000 дал спирта в сутки выход барды может достигать 400 т в сутки, что делает практически нереальным сбыт потребителю или утилизацию жидкой барды. Перевозить непереработанную барду невыгодно: большое содержание жидкости делает транспортировку этих отходов нерентабельной, тем более что в соответствии с требованиями федерального закона от 21 июля 2005 г. № 102-ФЗ в Российской Федерации вывоз жидкой барды за территорию спиртовых заводов запрещен.

В настоящее время на большинстве спиртовых заводов мира барду тем или иным образом перерабатывают, в основном на корма.

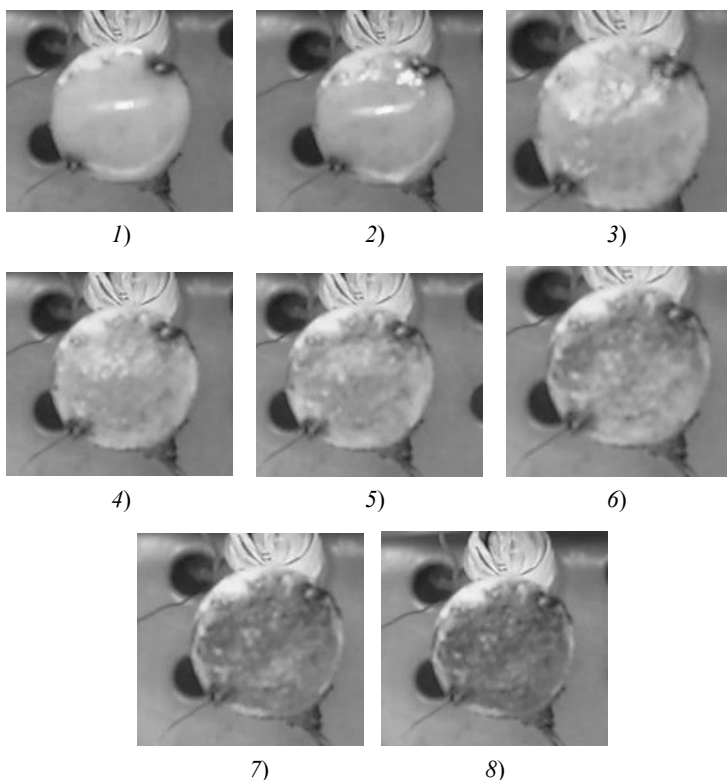
На сегодняшний день наиболее выгодным способом утилизации жидкой послеспиртовой барды является получение сухой послеспиртовой барды, соответствующей ГОСТ Р 53098–2008 (DDGS). Существует несколько технологий получения сухой барды. Наибольшее распространение получила технология утилизации, включающая применение центрифуг, выпарных установок и сушилок [134, 183]. В результате получается сухой сыпучий или гранулированный продукт стандарта DDGS. Основной проблемой использования такой технологии является быстрое образование отложений перерабатываемой барды на стенках технологических аппаратов. В основном загрязняются теплообменные поверхности теплообменников, выпарных аппаратов и сушилок [134, 149, 169, 182].

Выбор режима обработки жидкой барды для уменьшения величины адгезии отложений к поверхности и/или уменьшение скорости роста подобных отложений является весьма важной задачей, так как позволяет снизить себестоимость готового продукта [149, 150, 160].

Как показали наши исследования, в процессе сушки жидкой барды на всех режимах сушки наблюдаются следующие эффекты структурообразования.

На поверхности высыхающей капли и слоя барды в определенный момент времени начинает формироваться тонкая пленка. На рисунке 1.1 представлена кинограмма формирования тонкой пленки на поверхности высыхающей на подложке капли.

Это явление хорошо визуально наблюдается при анализе макровидеосъемки поверхности высыхающей капли с разных углов зрения. Тонкая пленка на поверхности высушиваемой барды формируется при всех исследованных режимах сушки.



**Рис. 1.1. Кинограмма процесса высыхания капли жидкой
послеспиртовой барды, нанесенной на фторопластовый диск (вид сверху).
Диаметр диска 8 мм:**

*1 – начало процесса; 1 – 3 – формирование пленки;
4 – 7 – формирование корки; 8 – окончание процесса (по данным работы [183])*

Соединение визуальных наблюдений с термограммой и кривой сушки позволяет определить время и температуру образца при начале формирования пленки. Обработка экспериментальных данных выявила, что окончательное формирование первоначальной тонкой пленки соответствует на термограмме процесса сушки определенной точке перегиба.

Эта точка перегиба отмечается при всех исследованных режимах сушки и характеризует начало монотонного роста температуры образца уже в первом периоде сушки, где для большинства жидких продуктов наблюдается так называемая «площадка» мокрого термометра.

Характерный вид термограммы показывает, что интенсивность испарения с поверхности высыхающей капли уменьшается.

При этом возникает проблема экспериментальной оценки скорости сушки, связанная со сложностью взвешивания малых объемов испаряющейся жидкости в движущемся потоке сушильного агента (т.е. необходима разработка специальных высокоточных (0,001 г) весов, позволяющих производить взвешивание в потоке) [171].

Таким образом, с определенной уверенностью можно сказать, что сформировавшаяся пленка оказывает определенное влияние на процесс сушки, а именно снижает скорость сушки уже в первом периоде.

Окончанием первого периода сушки являются падение скорости сушки (о котором можно судить из анализа кривой сушки), визуально наблюдаемая сильная усадка капли или слоя и формирование устойчивой корки на поверхности.

Свойства и характер корки зависят от режима сушки. При мягких режимах корка медленно густеет по толщине от момента начала формирования корки до момента, когда скорость сушки практически равна нулю. При этом температура образца медленно приближается к температуре сушильного агента. Исследования срезов высушиваемой капли показали, что срез в процессе сушки имеет различный цвет: от темного на поверхности до светлого к подложке. При этом постоянно по времени сушки срез темнеет внутрь к подложке. Корка имеет неровную поверхность, на которой отчетливо выделяются отдельные крупные частицы.

Необходимо отметить, что процесс сушки капли послеспиртовой барды идет в режиме закрепления контактной линии капли. Испарение капли жидкости на твердой подложке в режиме закрепления контактной линии наблюдается для многих биологических жидкостей (кровь), пищевых продуктов (кофе, чай), коллоидных растворов. При высыхании капель таких жидкостей наблюдается так называемый эффект «кофейных колец».

В процессе высыхания слоя и капли послеспиртовой барды наблюдается характерное изменение цвета поверхности. Как показали наши исследования, цвет поверхности при сушке барды хорошо коррелирует с качественными показателями сухого продукта, такими как влажность и сохранность питательных веществ [121, 154, 183].

Мясо-костная жидкость (МКЖ)

МКЖ представляет собой жидкость от коричневого до черного цвета со специфическим запахом. Жидкость получается как отход мясного производства и включает в себя несъедобные (для человека) отходы и конфискаты от убоя скота. Содержание твердой фазы в жидкости составляет 8...12% (масс.). Исходная жидкость содержит 29,8...30,9% жиров, 27,8% белков, 85 мг/кг пероксидов жиров. Сушат МКЖ в целях получения кормового продукта (для скота) в виде муки или геля (в зависимости от применяемого типа сушилки) с высоким

содержанием протеинов (40...60%). Конечная влажность муки 1...3%. Подробно свойства МКЖ исследовались в работе [181].

Сушку МКЖ проводили в конвективной сушилке на подложках в тонком слое (0,2...0,3 мм). В качестве подложек использовались пластины толщиной 2 мм из алюминия и фторопласта. При сушке МКЖ на всех режимах конечное влагосодержание сухого продукта практически равно равновесному влагосодержанию (вывод сделан по результатам экспериментов по досушке остатков в шкафу).

Визуальное наблюдение за поверхностью высыхающей МКЖ показывает отсутствие явлений структурообразования на поверхности в первом периоде сушки. При увеличении температуры сушильного агента для МКЖ наблюдается изменение цвета поверхности в конце второго периода сушки. Остаток МКЖ меняет цвет от светло-коричневого при мягких режимах сушки (T_c до 80 °С) до черного при жестких режимах (160 °С). Однако такое изменение цвета не связано с процессами структурообразования, а указывает на термолабильность сушеного продукта.

Исходя из анализа поведения термограмм сушки МКЖ, наблюдается классическая сушка, когда практически вся влага удаляется в первом периоде. Таким образом, исходная МКЖ является ярким представителем жидких дисперсных продуктов, не склонных в процессе сушки к структурообразованию.

Однако стоит отметить тот факт, что концентрирование исходной жидкости до 35...50% приводит к появлению на поверхности высыхающей жидкости пленки, т.е. к структурообразованию. При этом наблюдается изменение характера термограммы в первом периоде сушки для разных величин теплоподвода к высыхающему продукту.

Резиновый клей

Коллоидные растворы клея используются в легкой, резиновой, пищевой, химической промышленности. Процесс приготовления клея состоит из размельчения и смешивания сухих компонентов клея, загрузки их в клеемешалку, растворения в растворителях с постоянным перемешиванием. Затем производится розлив готового клея в емкости для дальнейшего использования. В промышленности существуют различные способы подготовки клеевых композиций, включающие приготовление, пластикацию и перемешивание резиновой смеси. Общим правилом при приготовлении клея является тот факт, что механическое перемешивание клеевой массы позволяет повысить прочность получаемых клеевых соединений примерно на 10% по сравнению с ручным перемешиванием. Также важно, чтобы температура клеевых компонентов не сильно отличалась от температуры помещения, в ко-

тором происходит процесс приготовления клея, чтобы при охлаждении компонентов в клей не попадала конденсированная влага, что ухудшает свойства клея. На производстве клей высушивают в распылительных сушилках и сушилках с кипящим слоем инертных тел.

Нами была исследована кинетика сушки резинового клея марки СВ-5 (изготовленного на основе каучука, магнезии, белил цинковых, бензина марки Б-70 и этилацетата). Сушку слоя клея производили на многорежимной визуальной сушильной установке. Были выявлены следующие особенности.

Высушиваемый образец клея после нанесения на подложку в течение 1...2 с покрывается тонкой пленкой. В процессе высыхания образец сначала увеличивается в размерах (разбухает), затем покрывается порами размером от 0,1 до 0,3 мм. Далее образец начинает уменьшаться в объеме. Дальнейшее течение процесса сушки приводит к уплотнению пленки и к ее приклеиванию к подложке. При этом выраженность отдельных эффектов зависит от режима сушки и сильно влияет на кинетику процесса.

Жидкий пластификатор бетона

Нами изучалась кинетика сушки суперпластификаторов, разработанных на основе лигносульфонатов и полиметиленафталинсульфонатов, производства ОАО «Пигмент», г. Тамбов, используемых для улучшения качественных показателей бетонной смеси. В настоящее время производство химических добавок для бетона – одно из стратегических направлений деятельности ОАО «Пигмент». Серия суперпластификаторов представлена на рынке под торговым названием «Кратасол». В товарной номенклатуре предприятия пластификаторы (в том числе аналог пластификатора С3) и суперпластификаторы, ускорители твердения, противоморозные добавки для бетона, комплексные продукты. Добавки для бетона серии «Кратасол» используются в производстве железобетонных изделий, тротуарной плитки, в строительных растворах, сухих строительных смесях [137, 138, 168].

Добавка для бетонов «Кратасол» относится к группе суперпластификаторов и добавок, регулирующих сохраняемость подвижности. «Кратасол» представляет собой смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфонокислот с высоким содержанием высокомолекулярных фракций. Добавка производится согласно ТУ 5745-333-05800142, в соответствии с EN 934-2.

Водный раствор пластификатора представляет собой однородную жидкость коричневого цвета. Плотность около 1170 кг/м³. Массовая доля воды не более 65%.

Характер высыхания на подложке жидкого пластификатора весьма интересен. Сначала испарение идет с поверхности жидкого продук-

та. Затем на поверхности визуально наблюдается формирование эластичной пленки. После формирования пленки начинают наблюдаться пульсации жидкости под пленкой разной амплитуды и частоты. В процессе высыхания жидкость из-под пленки удаляется с образованием воздушной прослойки.

Поверхностная пленка (в режиме закрепления контактной линии на подложке) поднимается вверх, опускается, различным образом деформируется с образованием поверхности сложной геометрической формы, хотя на термограмме практически не отображаются никакие особенные точки. В процессе высыхания пленка эволюционирует в довольно жесткую, пористую корку, которая в зависимости от режима сушки имеет разную степень адгезии к подложке.

Помимо промышленных жидких дисперсных продуктов нами исследовались модельные продукты, в частности коллоидный раствор крахмала и желатина, растворы сахара и хлорида натрия, а также суспензии на основе сухих порошков исследованных продуктов с заданными фракционным составом, размерами и формой частиц. Для сравнения получаемых кинетических особенностей модельные продукты готовились такой же концентрацией твердой фазы, что и промышленные.

Наиболее ярко явления поверхностного структурообразования наблюдаются при сушке продуктов природного и синтетического происхождения, содержащих мелкодисперсную твердую фазу. Покажем наиболее характерные явления структурообразования на примере сушки на подложках жидких дисперсных продуктов (на примере жидкой послеспиртовой барды и жидкого пластификатора бетона).

1.2. НАБЛЮДАЕМЫЕ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ ЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ

Основным явлением структурообразования при сушке жидких дисперсных продуктов на подложках является поверхностное структурообразование, проявляющееся в виде формирования на поверхности пленки, изменения формы поверхности, а также различные явления, меняющие характер высыхающей пленки и сухого остатка (например, изменение цвета поверхности). Рассмотрим характерные наблюдаемые явления.

1.2.1. Формирование поверхностной пленки

Мясо-костная жидкость

При сушке на подложке мясо-костной жидкости в первом периоде сушки испарение идет со свободной поверхности. При этом на поверхности не наблюдается формирование каких-либо структур типа

пленки и т.п. Постепенно в процессе удаления влаги начинает формироваться (визуально наблюдается с поверхности) слой остатка твердой фазы, лежащий на подложке. Хорошо визуальна форма и размеры частиц, формирующих слой. Слой по площади подложки имеет равномерную толщину. Только при сушке на жестких режимах сформировавшийся слой начинает менять цвет поверхности от коричневого до темно-коричневого (почти черного).

Жидкая послеспиртовая барда

Как уже указывалось выше, на поверхности высыхающей на подложке жидкой послеспиртовой барды (в виде капли или слоя определенной толщины) в некоторый момент времени начинает формироваться поверхностная структура – пленка. Формирование пленки на поверхности хорошо наблюдается визуально. На кинограмме процесса сушки капли жидкой барды (вид сверху), представленной на рис. 1.2, показан характер появления и формирования поверхностной пленки.

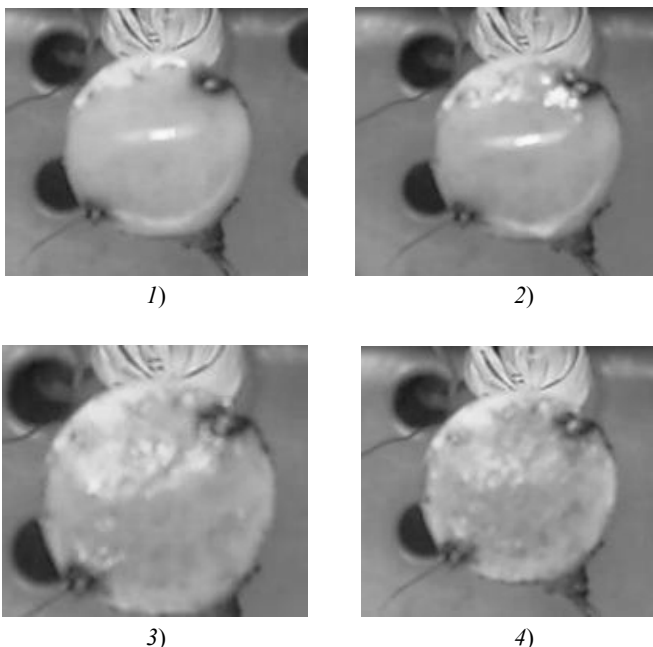


Рис. 1.2. Кинограмма формирования поверхностной пленки при сушке на фторопластовом диске капли жидкой послеспиртовой барды:

1 – начало процесса; 2 – появление пленки со стороны обдува;

3, 4 – окончательное формирование пленки

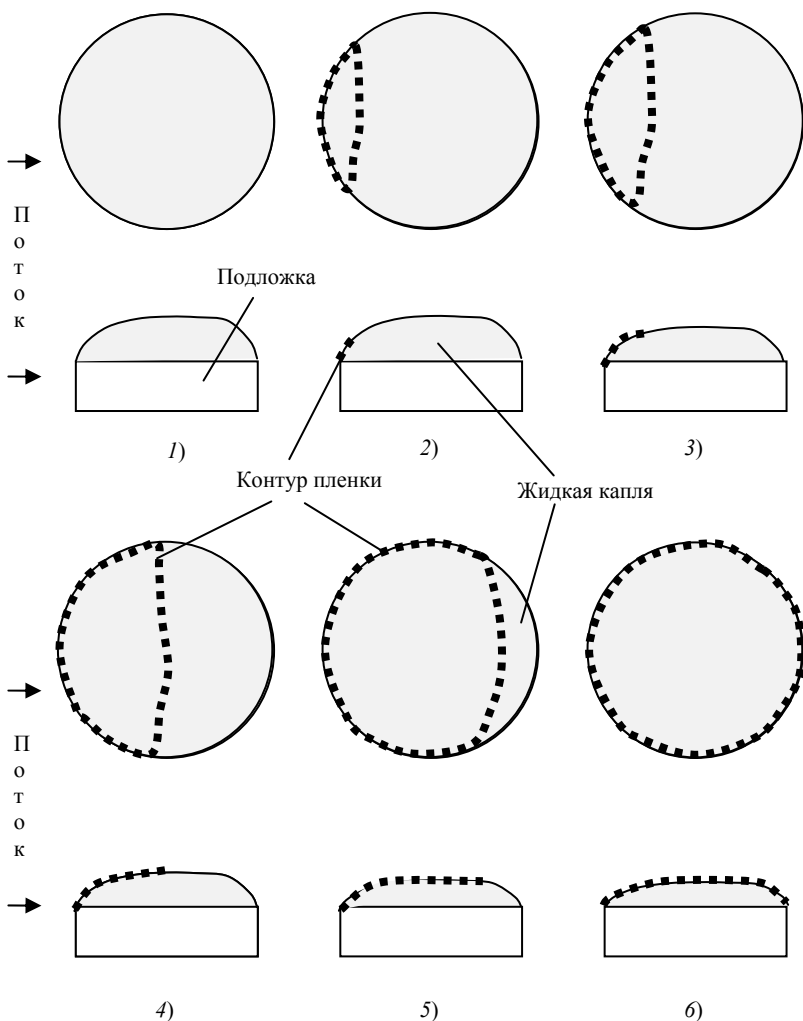


Рис. 1.3. Формирование тонкой пленки на поверхности высыхающей капли барды, нанесенной на твердую подложку:
 1 – начало процесса сушки; 2 – появление пленки на поверхности (со стороны обдува); 3 – 6 – формирование пленки по всей поверхности

На рисунке 1.3 представлена схема формирования поверхностной пленки при сушке капли барды на подложке [183].

Пленка на поверхности высушиваемой барды (капли или слоя) формируется при всех исследованных режимах сушки. Как показывает

анализ кинетических кривых сушки барды, в первом периоде наблюдается подъем температуры в районе площадки $T_{м.т.}$, а также наличие на площадке $T_{м.т.}$ некоторой точки перегиба.

Анализ видеозаписей формирования пленки на поверхности и кинетических кривых сушки показал, что окончательное формирование поверхностной пленки (для капли и слоя) соответствует на термограмме определенной точке перегиба. Эта точка отмечается для всех исследованных режимов сушки. Характер термограммы в районе точки перегиба на площадке $T_{м.т.}$ показан на рис. 1.4.

На рисунке 1.5 представлена корреляция визуально отмечаемого времени окончания формирования поверхностной пленки и времени, соответствующего точке перегиба на термограмме.

Как показывают кинетические кривые убыли веса, снижение интенсивности испарения, вызываемое образованием пленки, компенсируется увеличением температуры поверхности. Это явление экспериментально наблюдалось для всех продуктов, имеющих на термограмме определенное вырождение температурной площадки в районе $T_{м.т.}$

Положение точки перегиба температурной кривой определено связано с рассчитываемой температурой мокрого термометра и будет использоваться нами в дальнейшем для идентификации температурно-влажностных зависимостей (ТВЗ).

По окончании первого периода (оцениваемого по кривой сушки) визуально наблюдается достаточно сильная усадка капли (слоя). При этом для послеспиртовой барды удалось определить характер дальнейшей эволюции поверхностной пленки в некоторую объемную структуру – корку. Визуально отмечено, что начало образования корки характеризуется изменением цвета поверхности.

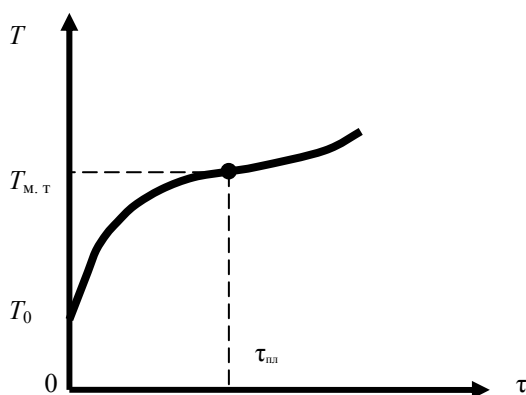


Рис. 1.4. Положение точки перегиба на термограммах сушки

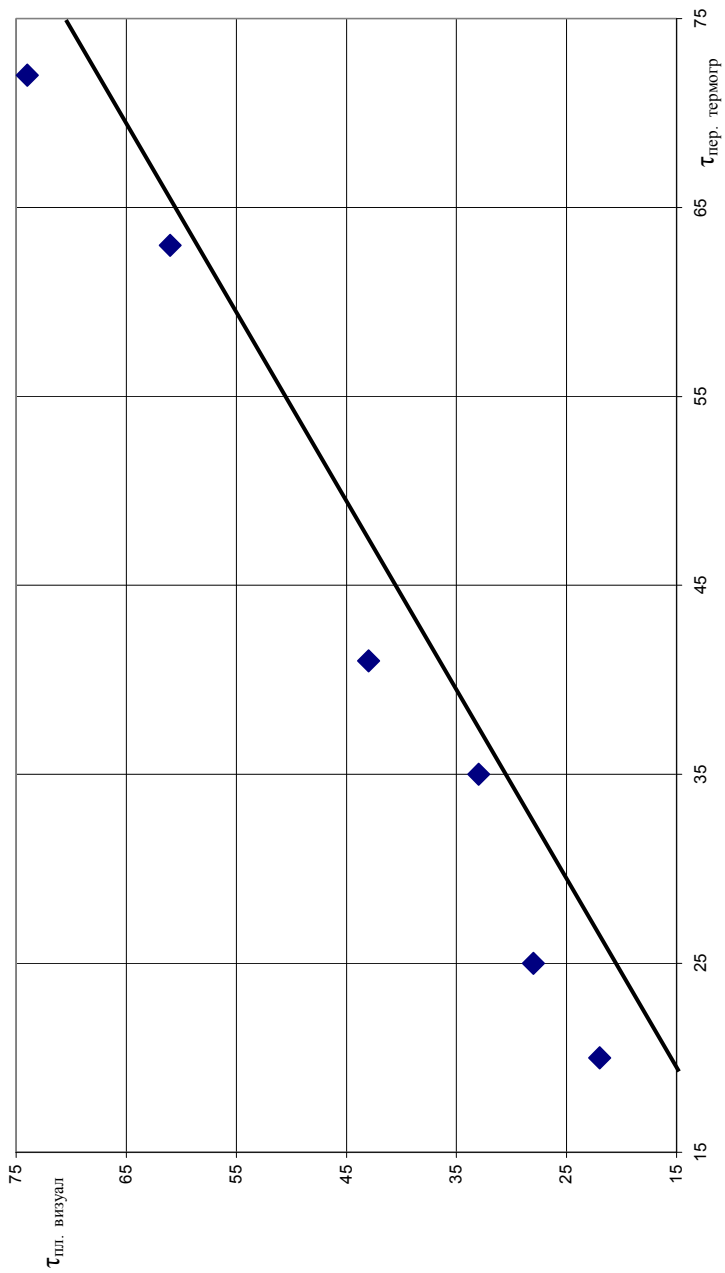


Рис. 1.5. Корреляция визуально отмечаемого времени формирования пленки и положения точки перегиба на термограмме

Анализ видеозаписей и кинетических кривых сушки показывает, что сформировавшаяся корка оказывает существенное влияние на кинетику процесса сушки: формирование корки характеризуется уменьшением скорости сушки.

Скорость формирования и эволюции цвета корки зависит от режима сушки. Корка имеет неровную поверхность, на которой отчетливо выделяются отдельные крупные частицы.

Жидкий пластификатор бетона

При сушке на подложке жидкого пластификатора ярко наблюдается формирование поверхностной пленки. В начале процесса поверхность высыхающей жидкости ровная, глянцевая. Затем концентрически, от контактной линии к центру слоя (капли) начинает формироваться пленка. Фото поверхности с пленкой и схема формирования пленки при сушке пластификатора приведены на рис. 1.6, 1.7.

Внутри (под пленкой) формируются определенные течения жидкости, приводящие к изменению формы высыхающего слоя и характера поверхностной пленки (см. далее). Пленка, начинающая свое формирование от контактной линии, постепенно продвигается к центру, занимая всю поверхность. При этом скорость формирования поверхностной пленки, ее вид и свойства определяются характером краевой пленки и режимом сушки.

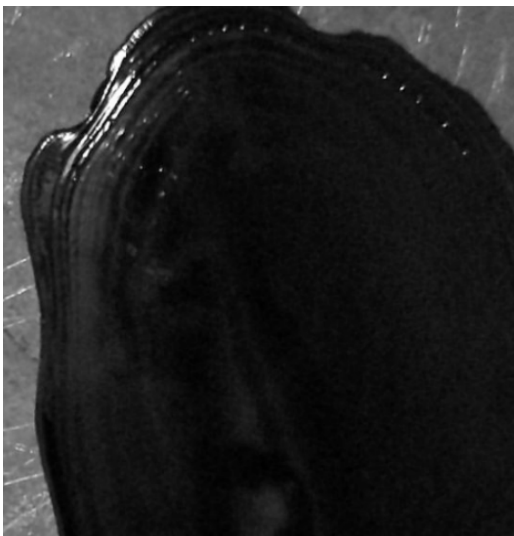


Рис. 1.6. Фото формирующейся пленки на поверхности высыхающего на подложке пластификатора

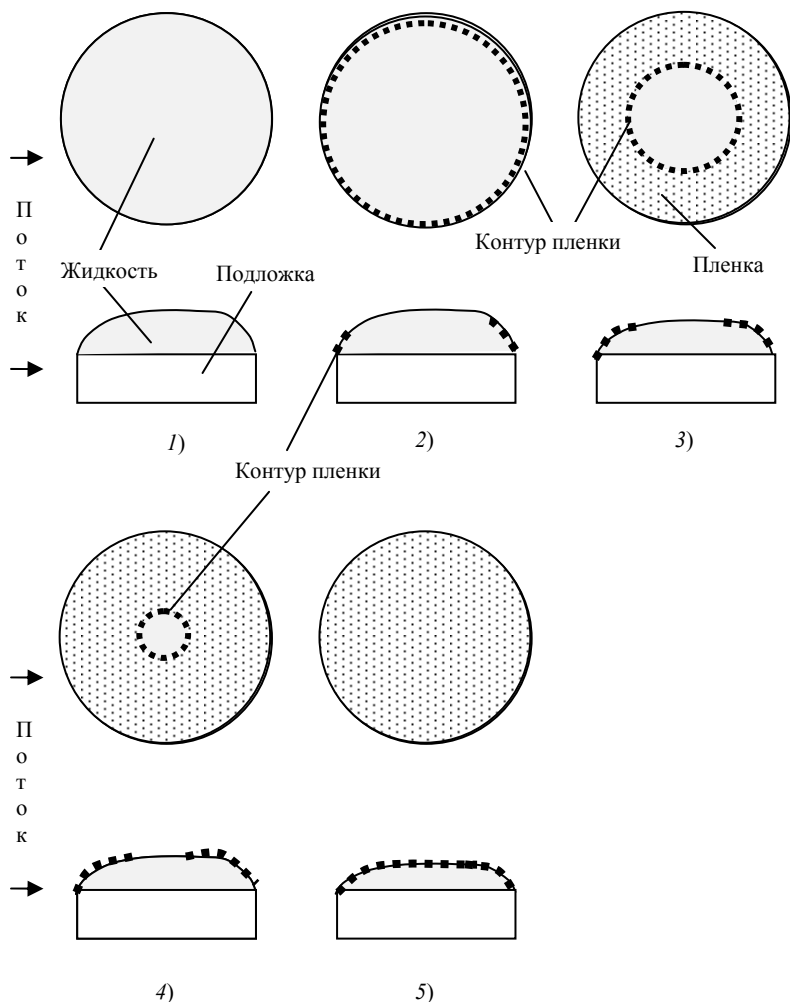


Рис. 1.7. Схема формирования поверхностной пленки при сушке пластификатора на подложке
(усадка слоя по толщине условно не показана)

На рисунках 1.8 и 1.9 представлены фотография с микроскопа краевых колец и схема формирования краевых колец.

При приближении температуры в слое к площадке кипения под пленкой начинают формироваться отдельные газовые пузыри, которые в процессе прорыва поверхностной пленки оставляют пустоты определенной формы, глубиной – практически по толщине слоя до подложки.

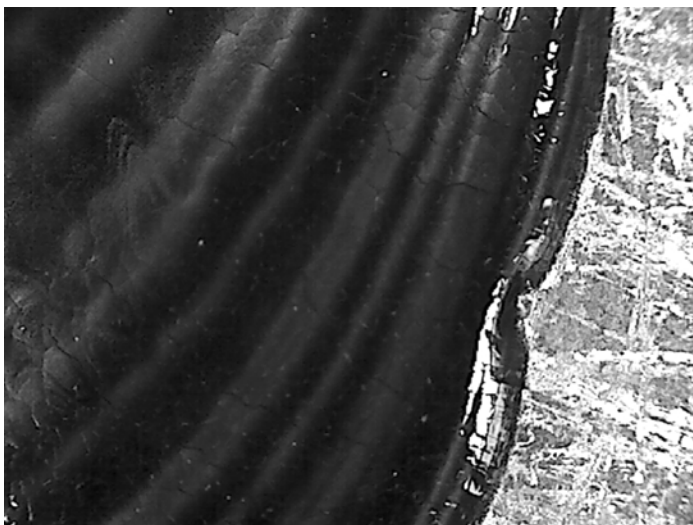


Рис. 1.8. Фотография с микроскопа характера краевой пленки
(увеличение $\times 50$)

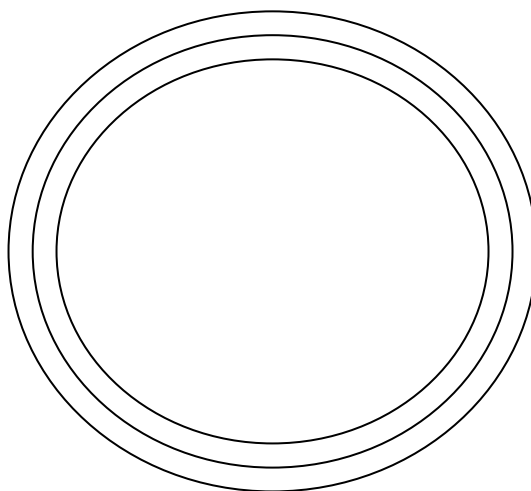
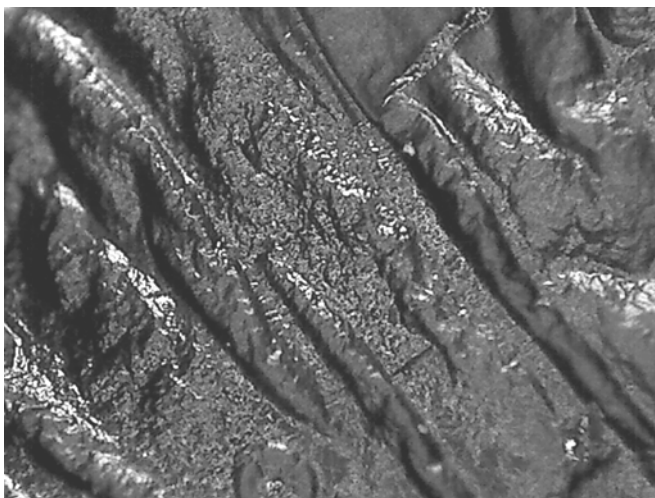
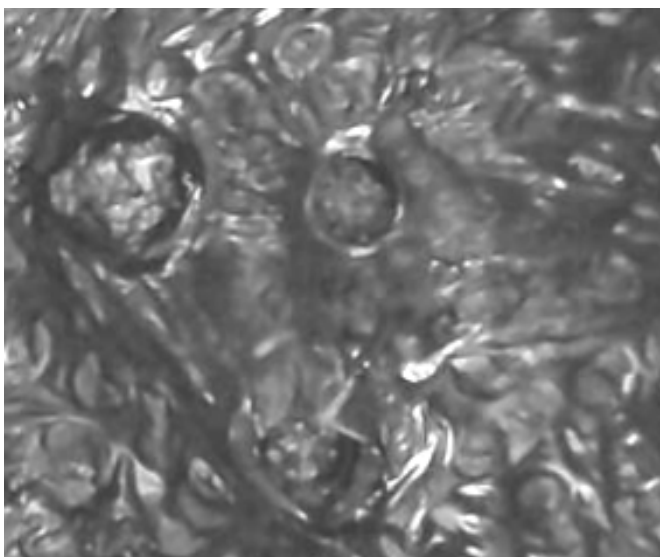


Рис. 1.9. Схема формирования краевых колец

В процессе высыхания поверхность неровная, с множеством «валов», «каналов», «кратеров». Фото отдельных поверхностных структур приведены на рис. 1.10.



a)



б)

Рис. 1.10. Отдельные элементы, формирующиеся на поверхности пластификатора при высыхании:

a – валы (увеличение $\times 50$);

б – прорывы газовых пузырей (увеличение $\times 25$)

1.2.2. Изменение формы поверхности

Для анализа характера изменения формы и размеров высыхающих на подложках материалов использовалась макровидео съемка сверху и сбоку образца с последующей компьютерной обработкой полученных изображений для оценки размеров (толщины, периметра) и краевых углов.

Послеспиртовая барда

Для жидкой барды характерно постоянство положения линии контакта жидкость–твердое тело во времени. Толщина высыхающего слоя изменяется в диапазоне от начальной толщины (определяемой исходя из объема нанесенной жидкости и условий смачивания) до некоторой конечной толщины слоя (оценки размеров см. далее).

При высыхании на поверхности не наблюдаются всплески/прорывы, прорывы газовых пузырей, волны и т.п. Внутри высыхающей капли и слоя могут формироваться некоторые течения, однако они непродолжительны, наблюдаются только на ранних стадиях сушки (характер таких течений в капле высыхающей барды подробно описан в работах [100, 182, 183]).

Схема изменения формы слоя высыхающей на подложке жидкой барды представлена на рис. 1.11. Необходимо отметить изменение цвета поверхности в процессе сушки, характерное для жидкой после спиртовой барды.

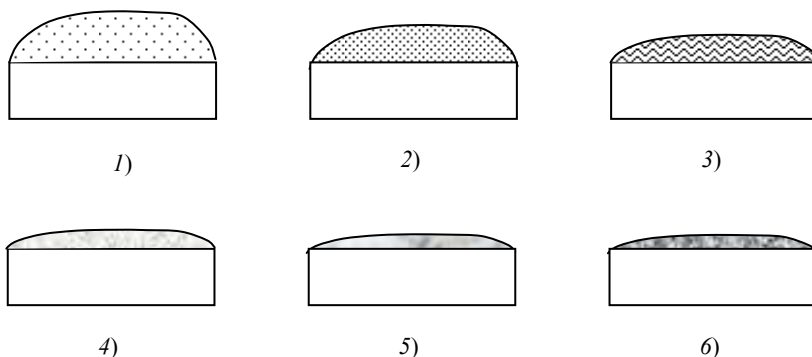


Рис. 1.11. Схема изменения формы слоя жидкой барды,

высыхающей на подложке:

1 – начальный момент времени;

6 – конечный момент времени

Пластификатор бетона

В отличие от барды характер изменения формы и размеров поверхности при сушке жидкого пластификатора более яркий и обладает определенными особенностями.

Как было показано ранее, на поверхности высыхающего пластификатора концентрически, от линии контакта к центру формируется пленка. В процессе сушки внутри под пленкой формируются течения жидкости, приводящие к изменению формы высыхающего слоя и характера поверхностной пленки: колебаниям поверхности, формированию волн, периодическим подъемам/опусканиям поверхности. При этом характер изменения поверхности на мягких и жестких режимах несколько отличается.

На рисунке 1.12 представлен характер изменения поверхности на мягких режимах.

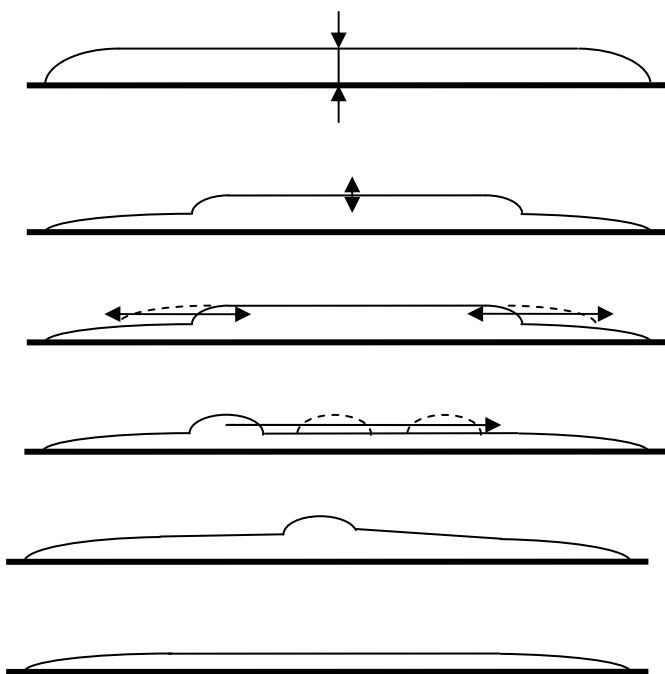


Рис. 1.12. Характер изменения поверхности на мягких режимах:

- 1 – начальное состояние; 2 – пленка по краям, в середине наблюдаются циклические подъемы/опускания слоя; 3 – пленка по краям, наблюдается циклическое движение формирующегося края пленки к периметру; 4 – волна по поверхности; 5 – пленка занимает практически всю поверхность, в центре подъем слоя; 6 – слой высох

На рисунке 1.13 представлен характер изменения поверхности на жестких режимах. Всплески/провалы поверхности на жестких режимах имеют ярко выраженный характер по сравнению с мягкими режимами. Отдельные подъемы поверхности могут зафиксироваться до конца процесса (см. рис. 1.14). На жестких режимах, на горячих подложках наблюдается явление отслаивания сухого слоя от подложки по периметру контактной линии.

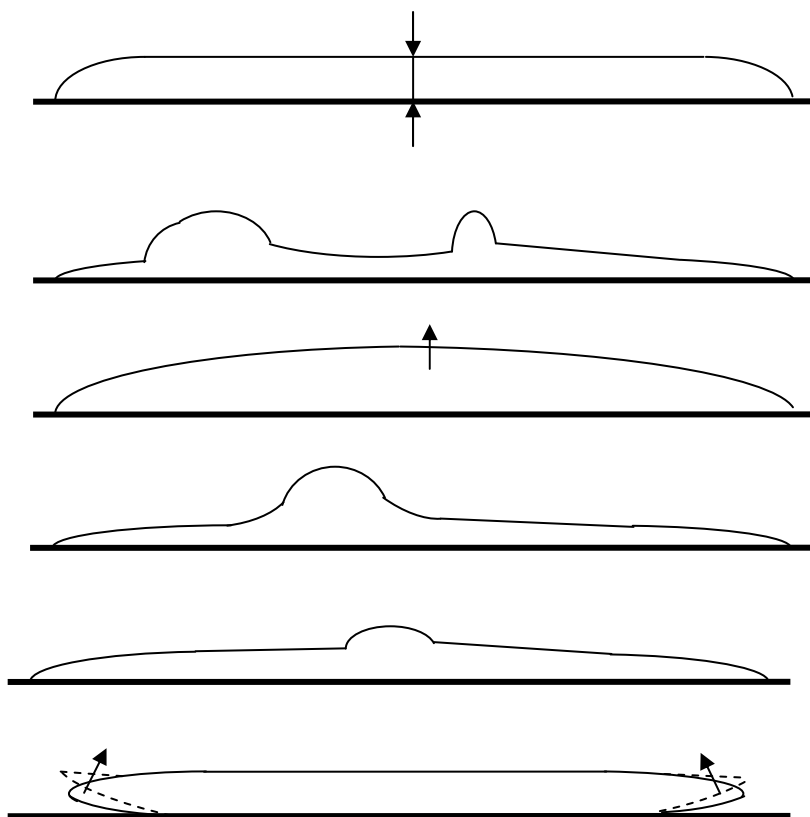


Рис. 1.13. Характер изменения поверхности на жестких режимах:

- 1 – начальное состояние; 2 – пленка по краям, наблюдаются отдельные циклические всплески/провалы слоя;
 3 – пленка по краям, наблюдается медленный подъем слоя;
 4, 5 – отдельные подъемы слоя; 6 – отслаивание сухого слоя от подложки по периметру контактной линии



Рис. 1.14. Фото сухого слоя пластификатора с зафиксированным подъемом поверхности (конец сушки)

1.2.3. Структура поверхности пленки и сухого остатка

По характеру поверхности пленки и сухого остатка можно судить о процессе поверхностного структурообразования. Численная оценка параметров формирующихся поверхностей (на основе компьютерного анализа полученных изображений) позволит моделировать процесс структурообразования и рассчитывать кинетику сушки жидких дисперсных продуктов на подложках с учетом этого сложного явления.

Послепиртовая барда

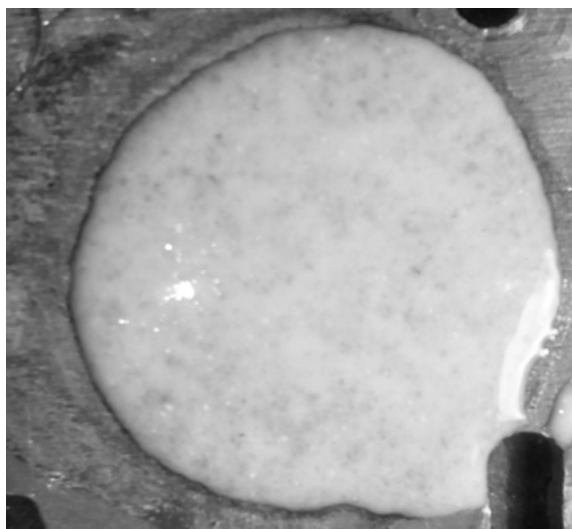


Рис. 1.15. Пленка в районе площадки $T_{м.т}$ (увеличение $\times 50$)

На рисунках 1.15 – 1.22 представлены некоторые фотографии поверхности пленки и сухого остатка, характерные для послеспиртовой барды.



Рис. 1.16. Сухой слой, мягкие режимы
(увеличение $\times 50$)



Рис. 1.17. Сухой слой, жесткие режимы
(увеличение $\times 50$)

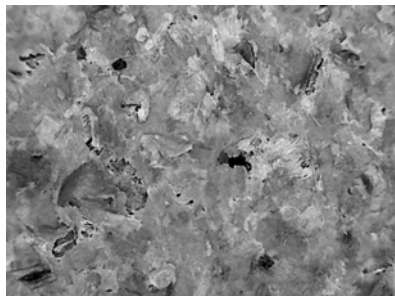
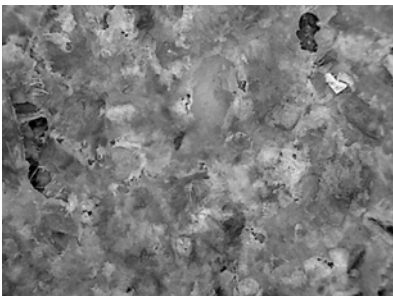


Рис. 1.18. Фотография с микроскопа – поверхность остатка зерновой барды (мягкие режимы, увеличение $\times 200$)

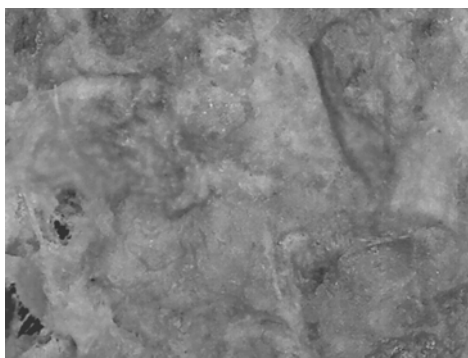


Рис. 1.19. Фотография с микроскопа – поверхность остатка зерновой барды (мягкие режимы, увеличение $\times 50$)

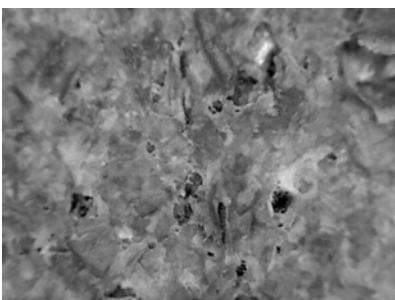
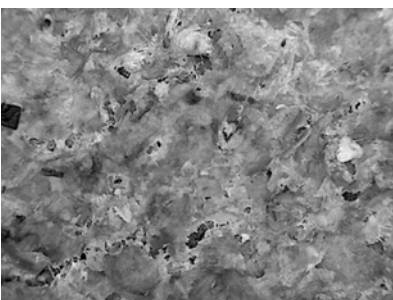


Рис. 1.20. Фотография с микроскопа – поверхность остатка кукурузной барды (жесткие режимы, увеличение $\times 200$)

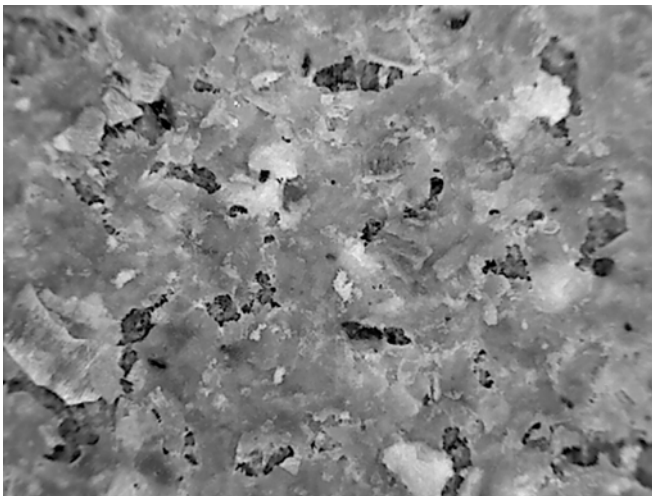


Рис. 1.21. Фотография с микроскопа – поверхность остатка кукурузной барды (мягкие режимы, увеличение $\times 200$)



Рис. 1.22. Фотография с микроскопа – поверхность остатка кукурузной барды (мягкие режимы, увеличение $\times 50$)

На рисунках 1.23 – 1.27 представлены некоторые фотографии поверхности пленки и сухого остатка, характерные для пластификатора бетона.

Микрофотографии сделаны с использованием цифрового микроскопа DNT DigiMicro 2.0, позволяющего производить наблюдения за исследуемым объектом в проходящем и отраженном свете с использованием поляризаторов при варьировании увеличения от 50 до $\times 250$.

Пластификатор бетона

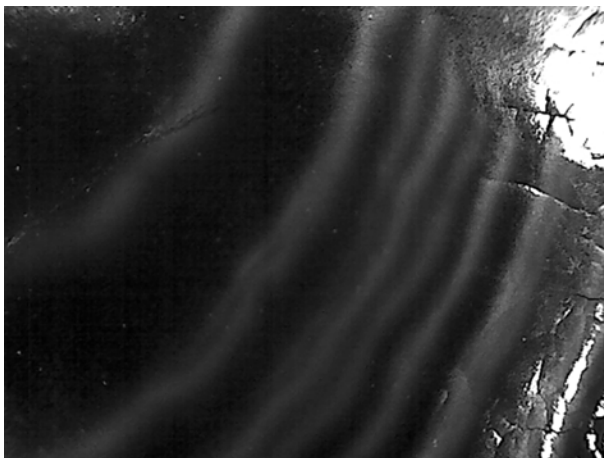


Рис. 1.23. Поверхность пленки – начало сушки (увеличение $\times 50$)

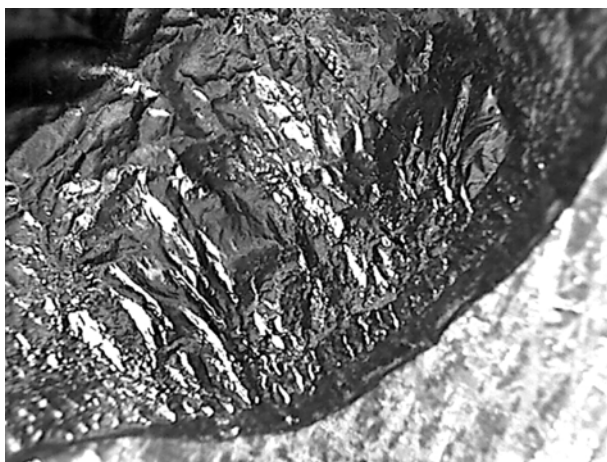


Рис. 1.24. Поверхность пленки – закрепление краевой линии (увеличение $\times 150$)

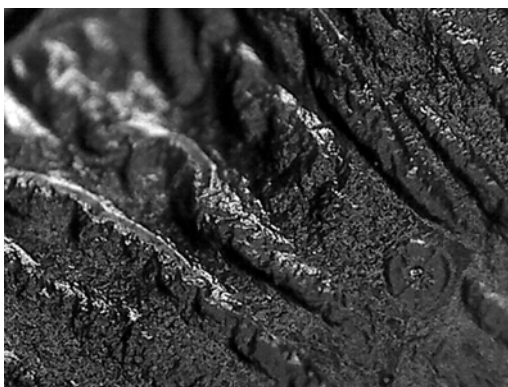
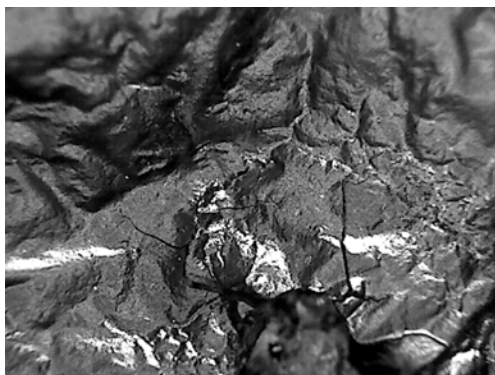
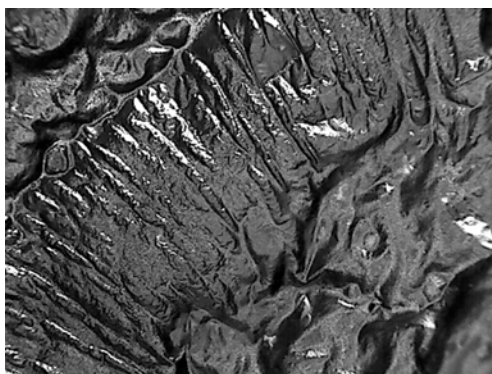


Рис. 1.25. Структура поверхностной пленки в процессе высыхания
(увеличение $\times 100$)



Рис. 1.26. Контактная линия (увеличение $\times 100$)

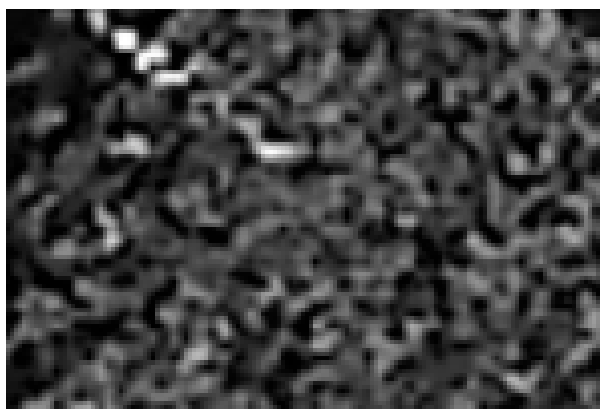
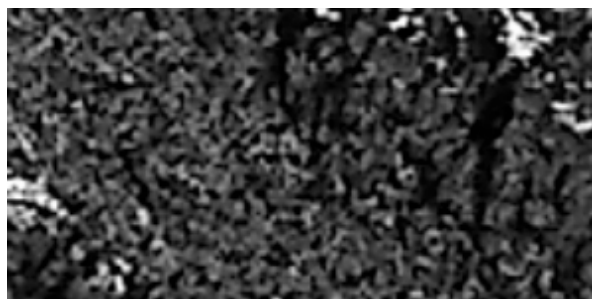


Рис. 1.27. Структура пленки высыхающего на подложке пластификатора (фото получено при сушке на фторопластовой подложке тонкого слоя при мягком режиме, увеличение $\times 250$)

1.3. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ПРОДУКТОВ, СКЛОННЫХ К СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЮ

Основные фундаментальные разработки в области исследований сушильных процессов в нашей стране и за рубежом принадлежат такому ученому, как А. В. Лыков, Б. С. Сажин, В. Ф. Фролов, А. А. Долинский, П. В. Акулич, В. И. Коновалов, С. П. Рудобашта и др. [1 – 99].

Истоком различных направлений сушильных исследований является школа академика А. В. Лыкова [1 – 5, 12, 17]. Его классическая система уравнений тепло- и массопереноса при сушке (зачастую называемая системой Лыкова) лежит в основе методов расчета кинетики сушки, применяемых большинством современных исследователей, о чем неоднократно упоминали в своих докладах ведущие сушильщики России, Белоруссии и Украины на прошедших в сентябре 2015 г. Первых Международных Лыковских научных чтениях, посвященных 105-летию академика А.В. Лыкова [184, 185]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau} &= D \frac{\partial^2 u(x, \tau)}{\partial x^2} + \delta_t \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}.\end{aligned}\quad (1.1)$$

Система уравнений (1.1) может применяться при расчетах кинетики сушки множества продуктов, но с учетом особенностей конкретного процесса и математических способов учета различных, зачастую нелинейных уравнений, учитывающих структурно-механические и физико-химические явления, наблюдаемые в процессе сушки.

Одним из упрощенных методов решения задачи сушки является применение балансно-кинетических методов расчета кинетики сушки на базе так называемого основного уравнения кинетики сушки (название дано А. В. Лыковым):

$$Q_{\text{исп}} + Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{подвод}} \quad (1.2)$$

Основные сложности, связанные с получением решений на базе уравнения (1.2), состоят в следующем:

1) внешний тепло- и массообмен, как правило, не является стационарным. Точно рассчитать значения коэффициентов тепло- и массоотдачи $\alpha_{\text{исп}}$ и $\beta_{\text{исп}}$ возможно только для периода стабилизации температуры на площадке, температуры мокрого термометра для первого периода. В другое время процесса возможна лишь оценка характера изменения коэффициентов тепло- и массоотдачи;

2) необходим выбор конкретного, адекватного исследуемому процессу, типа аппроксимации, необходимой для решения основного уравнения кинетики сушки, что является отдельной, весьма сложной задачей. На практике с этой целью используются аппроксимация температурно-влажностных зависимостей или аппроксимация скорости сушки.

Для решения уравнений тепло- и массообмена при сушке необходим расчет или корректная оценка величин коэффициентов переноса. В основном закрепились традиции использования для этого теории подобия [40]. Большинство современных исследователей в своих публикациях по сушке приводят собственный вид критериальных зависимостей (основанный на традиционном виде подобных уравнений) для расчета значений коэффициентов тепло- и массообмена при конкретных условиях в определенном режимном диапазоне (например, см. работы [10, 12, 25, 26, 29, 31, 52, 95]).

При сушке большинства жидких дисперсных продуктов наблюдается явление уменьшения толщины высыхающего слоя и движения границы раздела фаз. Эта нестационарная задача с подвижными границами фаз называется проблемой (задачей) Стефана. Ее решением занимались и занимаются сейчас в основном применительно к практическим задачам промерзания грунта, актуальным при строительстве различных зданий и сооружений.

В случае процесса сушки жидких дисперсных продуктов в первом периоде, как правило, наблюдается изменение толщины слоя, а во втором возможно углубление зоны испарения внутри сформировавшегося твердого каркаса. Таким образом, основной сложностью является описание появляющейся в результате движения межфазной границы новой поверхности, ранее принадлежавшей другой фазе.

Основными способами решения этой задачи является применение различных численных методов, сводящих нестационарную задачу с подвижными границами к задаче с неподвижными границами, на определенном временном интервале, с использованием в районе фазового перехода определенных сглаживающих функций, зависящих от параметров процесса (например, от температуры), учета баланса массы на границе с пересчетом временного интервала и свойств продуктов [94, 102, 132].

До сих пор при исследовании сушильных процессов актуальными являются вопросы применения различной измерительной техники и погрешности получаемых значений. Это особенно актуально при исследованиях сушки малых объемов жидких дисперсных продуктов (капель, тонких слоев), когда влияние внешнего теплового источника может существенно исказить реальную картину процесса. Опубликовано ряд работ, посвященных этим задачам [19, 20, 24, 139, 171]. Указа-

ны факторы, вносящие погрешность в процесс измерений и способы их устранения (минимизации) или учета.

В наших исследованиях мы также коснулись возможностей оценки погрешностей измерения температуры (и других характеристик процесса сушки) в условиях наших экспериментов [135, 139].

В процессе сушки на подложках жидких дисперсных продуктов на поверхности высыхающего продукта наблюдаются определенные явления структурообразования, например, формируется и определенным образом эволюционирует пленка, оказывающая определяющее влияние на кинетику процесса и качество готового продукта.

Классически исследователи явлений структурообразования занимаются рассмотрением этих вопросов в области коллоидной химии и поверхностных явлений. Широко известными научными школами, работающими в этой области, являются школы проф. П. А. Ребиндера, проф. А. И. Русанова, проф. Б. В. Дерягина, проф. Ю. А. Чизмадзе и их последователей [41 – 51, 60 – 65].

В фундаментальных работах [41, 44, 47, 50, 51] представлены современные взгляды на поверхностные явления, процессы переноса в капиллярно-пористых телах, рассматривается теория устойчивости коллоидных тел. Дается подробное описание механизма формирования мицелл, двойного электрического слоя, формирования и устойчивости дисперсных систем. Представлено описание и практическое применение теории коагуляции коллоидных систем ДЛФО. Указаны теоретические представления по коагуляции дисперсных систем, их устойчивости, влиянию поверхностных сил на кинетику структурообразования. Дается описание периодических коллоидных структур, сходных по своим свойствам и геометрии с наблюдаемыми структурами, возникающими при сушке жидких дисперсных продуктов на подложках. В большинстве работ указывается на необходимость исследований в области поверхностных явлений для выработки определенной теоретической базы подобных явлений.

В работах [45, 46] приводятся данные по некоторым поверхностным явлениям применительно к технологии ПАВ. Приводится метод расчета толщины пленки ПАВ, формирующейся на поверхности.

В работах [49 – 51, 61, 74] рассматривается влияние структурообразования на плотность жидких дисперсных продуктов. Приводятся модели массопереноса в капиллярно-пористых телах, моделирующих возникающие поверхностные пленки. Моделируется только процесс диффузии. Даны аппроксимационные зависимости проницаемости пленки и коэффициента диффузии.

При достаточно широком освещении проблем поверхностных явлений в коллоидах имеется достаточно ограниченное количество публикаций по структурообразованию на поверхности именно в процессе

сушки. Как правило, в работах ограничиваются только качественными описаниями наблюдаемых явлений и описанием возможностей применения компьютерной техники и определенного математического аппарата для моделирования.

В последнее время большую актуальность приобрели исследования процесса сушки капель жидких дисперсных продуктов на подложках и непосредственно в потоке сушильного агента (в свете практического использования различных эффектов, наблюдающихся при сушке, появившихся возможностей их объяснения и моделирования).

Имеется большое количество публикаций ведущих исследовательских организаций мира и нашей страны. Например, вопросами сушки капель в нашей стране занимаются сотрудники института прикладной физики РАН, института теплофизики им. С. С. Кутателадзе, Национального исследовательского Томского политехнического университета, Института теоретической физики им. Л. Д. Ландау, Астраханского государственного университета, Волгоградского государственного технического университета. Известны публикации зарубежных исследователей из ведущих научных центров Белоруссии, Франции, Канады, США, Сингапура. Подробный анализ проводимых разработок с обширной библиографией представлен в работах [182, 183].

Имеется ряд публикаций о влиянии структур, возникающих при сушке капель, свойств жидкостей и режимных параметров на цвет поверхности [100, 183]. Подобные исследования в основном связаны с процессами сушки и тепловой обработки пищевых продуктов и красителей. В некоторых работах приводятся попытки математического описания цвета поверхности, даются аппроксимационные зависимости цвета от свойств продукта и/или значений коэффициентов тепло- и массообмена. Хотя в большинстве публикаций ограничиваются лишь описанием характера изменения цвета поверхности.

Проводятся исследования формирования определенных наноразмерных структур при сушке на подложке капли, содержащей коллоидный раствор частиц редких и благородных металлов. Дается попытка математического описания механизма структурообразования при испарении и сушке с помощью численного решения взаимосвязанных задач течения жидкости, диффузии и теплопроводности в объеме капли [64, 65].

Отдельный интерес вызывают исследования процессов сушки капель жидкостей, содержащих молекулы белка, а также биологических жидкостей человека. Оценка кинетики процесса, а также структур, возникающих в высыхающем и сухом продуктах, исследуется для возможностей медицинской диагностики различных заболеваний на ранней стадии. Отдельно прикладными задачами в этом направлении являются исследования кристаллографии белка, тестирование новых

лекарственных средств, вопросы сохранения и длительной консервации биоматериалов [61].

Современные исследования процессов сушки проводятся с использованием самых передовых методов регистрации параметров процесса во взаимосвязи с наблюдаемыми эффектами. Во всех исследованиях отмечается организация на поверхности высыхающей капли пленки или корки, изменяющей свой цвет, размер и механические свойства и оказывающей определяющее влияние на процесс сушки или процесс собственно структурообразования. В некоторых работах отмечается сильная неравномерность температур по объему на поверхности мелких капель жидких дисперсных продуктов при их сушке (ранее в таких объемах задачу считали безградиентной), указывается влияние на характер испарения формирующихся течений Марангони, отмечаются эффекты капиллярной природы. Приводятся гипотезы о возможном механизме формирования поверхностных структур, связанные с миграцией твердых частиц и их агломератов к краевой границе контакта капли и подложки [49].

Необходимо отметить, что при всем многообразии публикаций, посвященных тематике высыхания капель жидкости, нанесенных на подложку, в настоящее время практически нет публикаций по кинетике сушки капель производственных жидкостей на твердых подложках или в потоке в гидродинамических условиях, наблюдаемых в реальных аппаратах.

С развитием компьютерной техники и программного обеспечения (например, системы мультифизического моделирования различных тепло- и массообменных процессов, осложненных структурно-механическими деформациями Comsol Multiphysics, ANSYS и др.) появилась возможность активного использования численных методов и математического аппарата, ранее практически не использовавшегося.

Используемые в настоящее время методы моделирования кинетики сушки можно условно разделить на следующие группы:

1. Методы совместного решения задач тепломассобмена на основе системы Лыкова.
2. Балансно-кинетические методы на основе: температурно-влажностных зависимостей, различных аппроксимаций скорости сушки и собственно температурной кривой.
3. Методы, основанные на решении задач диффузии.
4. Методы, основанные на отдельном решении задачи теплопроводности и диффузии с различными взаимосвязями.
5. Различные комбинации рассмотренных выше методов.

Для сушки тканей и тонких материалов в основном используется получение результатов, при совместном решении задач тепломассоб-

мена на основе системы Лыкова. При этом весьма эффективно используются аналитические решения задач переноса для тел канонической формы.

Балансно-кинетические методы регуляризации режима сушки используются для исследований процессов диффузии и теплопроводности в волокнистых и капиллярно-пористых телах малой влажности.

В работах проф. С. П. Рудобашты [30 – 39] основой методов расчета кинетики сушки являются оценки условий безградиентной и определяющей роли диффузии или теплопроводности. Этот подход применяется в основном для неусаживающихся непористых слабонабухающих материалов с твердым скелетом.

Отметим особенности методов моделирования процессов сушки, разрабатываемых в работах научной школы проф. В. И. Коновалова [81 – 185].

Для расчета кинетики сушки волокнистых материалов, тканей, пропитанных шнуров от воды и растворителей использовался балансно-кинетический метод на основе аппроксимаций температурно-влажностных зависимостей [81 – 99]. При этом выделялись факторы, лимитирующие процесс сушки, и учитывалось их влияние на кинетику в виде критериев определенного вида. Подробное изложение этого метода применительно к сушке тонких слоев капиллярно-пористых материалов представлено в работах [118, 181, 183].

Для расчета кинетики сушки жидких дисперсных продуктов (в виде слоя или капли) на подложках используется так называемый интервальный метод решения взаимосвязанной задачи теплопроводности и диффузии на основе аналитических решений задач переноса для тел канонической формы [100, 102, 114, 121, 123, 130, 132]. Основная идея метода состоит в разделении процесса сушки на определенные временные интервалы (зоны). Длительность временного интервала можно задать жестко неизменяемым от зоны к зоне, а можно оценивать величину интервала для каждого последующего шага. В каждой зоне рассчитываются свойства высушиваемого продукта и тепло- и массообменные характеристики процесса. Возможно применение как аналитических решений задач тепло- и массопереноса в пределах каждой зоны, так и численных методов.

Фактически нелинейная задача тепло- и массопереноса линеаризуется на определенном временном интервале с соответствующими граничными и начальными условиями. Взаимосвязь тепло- и массопереноса можно учесть температурно-влажностными зависимостями, с учетом эффективных коэффициентов переноса и характеристик или приближенными оценками коэффициента диффузии. Таким образом, в решении максимально учитывается механизм процесса (реальный или предполагаемый) в исследуемых условиях.

Этот же метод успешно использовался и при расчете кинетики сушки кристаллообразующих растворов, а также волокнистых материалов, высушиваемых на контактных барабанах. Подробно метод описан и реализован в работах [118, 126].

Необходимо отметить, что на основе многочисленных экспериментов по сушке как жидких дисперсных продуктов, так и капиллярно-пористых материалов и анализе кинетики их сушки в работах проф. В. И. Коновалова и учеников его школы предложено выделение шести основных типов кинетических кривых, характеризующих наличием/отсутствием, формированием/вырождением температурных площадок при различных (мягких и жестких) режимах сушки [125, 181 – 183].

На сегодняшний день для описания кинетики сушки развивается ряд новых физико-математических методов моделирования, которые можно объединить в следующие группы [110, 111]:

1) структурно-сетевые модели пористых и корпускулярных сред на основе математического аппарата нейронных сетей;

2) методы, использующие положения теории перколяции (просачивания), применяющиеся для моделирования условий переноса жидкости или газа в пористых средах;

3) методы так называемого кластерного анализа, применяющие статистическое выявление некоторых связанных структур и их взаимосвязь с тепло- и массопереносными свойствами среды;

4) методы фрактального анализа, основанные на теории фрактальной геометрии;

5) комбинированные методы, использующие идеи вышеуказанных методов.

Исторически сложилось, что большинство работ по применению фракталов к задачам переноса принадлежат зарубежным авторам [191 – 318]. Имеется целый ряд работ [275 – 283] представляющих прикладной характер применения фракталов к описанию различных процессов. В этих работах, как правило, ограничиваются получением фрактальной поверхности и оценкой ее фрактальной размерности.

Публикации, касающиеся применения фракталов к моделированию непосредственно процессов сушки, в работах российских исследователей практически отсутствуют. Однако имеются зарубежные публикации, в основном в ведущем мировом журнале, посвященном вопросам сушки – *Drying Technology*, так или иначе касающиеся применения фракталов в области сушки жидких дисперсных продуктов, например [199, 219, 275 – 281].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

2.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования жидких дисперсных продуктов, в процессе сушки которых наблюдаются эффекты структурообразования, были выбраны промышленные продукты природного и синтетического происхождения.

В качестве продукта природного происхождения была выбрана послеспиртовая барда (кукурузная и зерновая) как продукт, формирующий характерные поверхностные и объемные структуры в процессе сушки. Исследование кинетики сушки жидкой послеспиртовой барды также актуально исходя из проблем и требований развития спиртовой промышленности в Российской Федерации (в частности: решение проблемы полной утилизации жидкой послеспиртовой барды; решение задачи энергоэффективного производства этилового спирта с заданной проектной мощностью предприятия; повышение производительности спиртовых заводов в целом).

В качестве продукта синтетического происхождения был выбран суперпластификатор «Кратасол» (смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот с высоким содержанием высокомолекулярных фракций) производства ОАО «Пигмент», г. Тамбов, как продукт, формирующий характерные поверхностные и объемные структуры в процессе сушки. Исследование кинетики сушки жидких пластификаторов весьма актуально в свете проблем и требований строительной промышленности и химических предприятий, производящих добавки в строительные смеси.

В качестве продукта, сходного по основным теплофизическим свойствам с выбранными, для исследования использовали мясокостную жидкость как продукт, слабо склонный к структурообразованию в исходном виде.

Так же для выдвижения гипотез и их проверки дополнительно в отдельных сериях экспериментов использовались: коллоидные растворы крахмала и желатина, жидкий белковый концентрат, некоторые марки резиновых клеев, красителей и модельных суспензий.

Для проведения экспериментальных исследований по сушке жидких дисперсных продуктов на подложках и изучения процессов структурообразования были (исходя из значений теплофизических свойств и из распространения материалов в технологической аппаратуре) выбраны следующие материалы подложек:

- фторопласт Ф-4;
- алюминий (А85);
- сталь (марки: Ст3 и 12Х18Н10Т);
- медь МЗр.

В некоторых опытах использовались подложки из резины (марка 9024).

Основные теплофизические свойства применяемых материалов представлены в табл. 2.1.

По форме подложки должны максимально соответствовать условиям сушки в реальных аппаратах и быть удобными для проведения эксперимента и возможности обработки получаемых данных.

Как показали работы по кинетике сушки жидких дисперсных продуктов [81 – 184], для исследования сушки слоев и капель жидких дисперсных продуктов в качестве конструкции подложки наиболее удобно использовать диск и прямоугольную пластину. Схемы использованных подложек представлены на рис. 2.1, 2.2.

Как показали исследования, кинетика сушки зависит от действия поверхностных сил и проявляющихся при этом явлений. Например, при сушке капли на подложке можно наблюдать интереснейшие краевые эффекты и влияние кривизны поверхности капли на кинетику сушки. Этот эффект не наблюдается при сушке на подложке слоя определенной толщины. Однако при сушке слоя можно ярче наблюдать те эффекты, которые слабо проявляются при сушке капли.

2.1. Некоторые теплофизические свойства материалов подложек

Материал	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	ϵ
Фторопласт Ф-4	0,25	1050	2215	0,3...0,8
Сталь Ст3	46,5	593...462	7850	0,50...0,96
Сталь 12Х18Н10Т	15...18	462	7920	0,3...0,7
Алюминий А85	203	920	2700	0,05...0,80
Медь МЗр	384...387	350...400	8900	0,57...0,87
Резина 9024	0,163	972...1300	1500	0,90...0,96

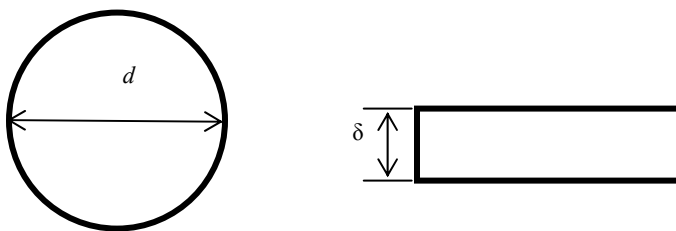


Рис. 2.1. Схема дисковой подложки для капли
($d = 7$ мм, $\delta = 2 \dots 20$ мм)

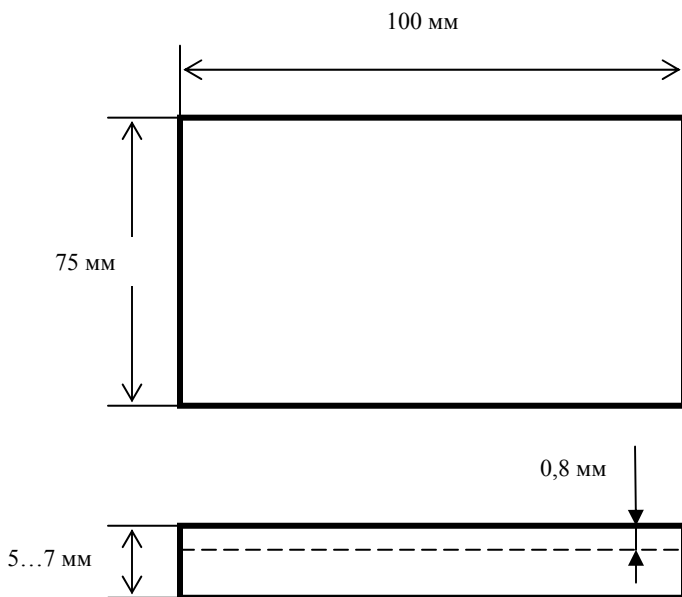


Рис. 2.2. Схема прямоугольной подложки для слоя

Для проведения исследований кинетики сушки продуктов, склонных к структурообразованию, были разработаны установки для сушки капли и слоя.

Для исследования механизма и кинетики процесса сушки жидких дисперсных продуктов в тонких слоях на подложках нами была разработана многорежимная экспериментальная установка для исследования кинетики сушки тонких слоев жидких дисперсных продуктов при свободной и вынужденной конвекции, кондукции и с возможностью теплоподвода излучением.

Установка позволяет производить экспериментальное исследование процесса в широком диапазоне температур сушильного агента (характерном для промышленных сушильных установок), в широком диапазоне температур подложки (так называемой горячей и холодной) и широком диапазоне скоростей потока сушильного агента, с возможностью варьирования в процессе эксперимента скорости потока и способа обдува (например, задание определенных углов, пульсаций, направлений потока и т.п.).

Установка позволяет исследовать процесс сушки тонкого слоя дисперсного продукта в условиях естественной или вынужденной конвекции, теплового излучения, либо их комбинаций. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.3.

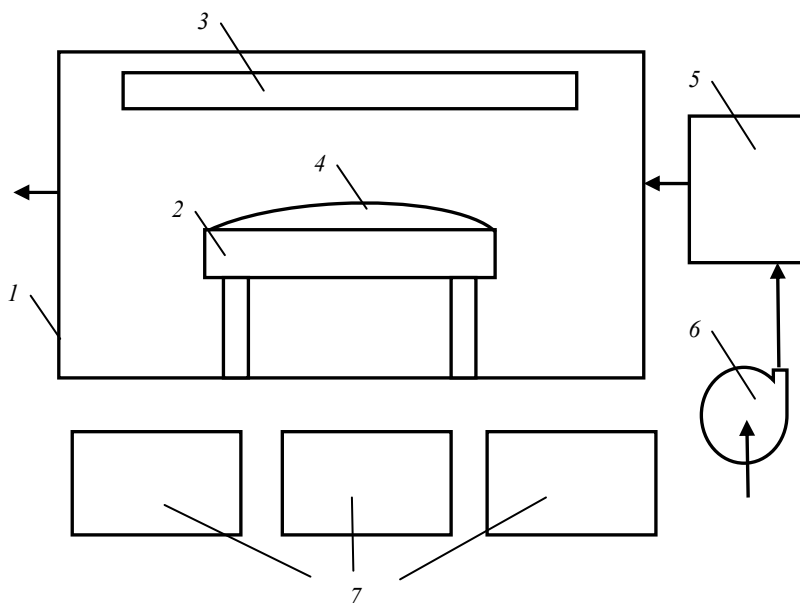


Рис. 2.3. Схема экспериментальной многорежимной сушильной установки:

- 1* – сушильный шкаф;
- 2* – плита с электроподогревом с установленной подложкой;
- 3* – тепловой излучатель; *4* – слой высушиваемой жидкости;
- 5* – калорифер; *6* – вентилятор;
- 7* – система управления и контроля

Диапазон температур сушильного агента от 20 до 250 °С. Диапазон температур электронагревателей при использовании нагревательной плиты в качестве источника тепла от 20 до 300 °С. Диапазон скоростей обдува от 0,5 до 10,0 м/с. Контроль температур производится с помощью термопар ХК диаметром 0,1 мм (внутри подложки, в потоке, на границе контакта подложки и высушиваемого продукта) и пирометром марки Raytek minitemp МТ6 (поверхность высушиваемого материала, поверхности излучателей, стенки термощафа).

Применяемые системы управления и контроля позволяют автоматически поддерживать заданные температуры сушильного агента, излучателей и электроплиты и управлять скоростью сушильного агента внутри шкафа.

В основном в промышленных установках тепловые излучатели находятся над высушиваемым материалом, поэтому теплоподвод излучением в данной установке реализован только сверху. В качестве излучателей использовались линейные кварцевые излучатели со следующими характеристиками:

- длина волны 1,5...3,0 мкм;
- температура излучающей поверхности > 700 °С;
- мощность > 1 кВт;
- размеры 12×250 мм.

Если необходимо исследование кинетики сушки без использования теплоподвода со стороны греющей плиты, то она демонтируется и подложка устанавливается непосредственно на траверсу динамических весов. Кривая убыли веса записывается постоянно в течение всего процесса.

Регистрация убыли веса при теплоподводе с кондукцией осуществляется периодическим взвешиванием высушиваемого образца, закрепленного на специальном устройстве взвешивания.

Для исследования механизма и кинетики процесса сушки капель жидких дисперсных продуктов на подложках нами была разработана визуальная многорежимная экспериментальная установка. В установке реализовано исследование процесса сушки в диапазоне температур сушильного агента, характерного для промышленных сушильных установок, использование потока сушильного агента с задаваемыми в эксперименте скоростью потока и способом обдува (например, задание определенных углов, пульсаций, направлений потока и т.п.). Схема установки представлена на рис. 2.4.

Для исследования механизма и кинетики процесса сушки в установке используются материалы в жидком состоянии, наносимые в виде капли на подложку. Также применяется способ удержания капли на термопаре без подложки. В качестве подложки можно использовать любой материал, любой толщины, устанавливать подложку под любым углом к набегающему потоку сушильного агента.

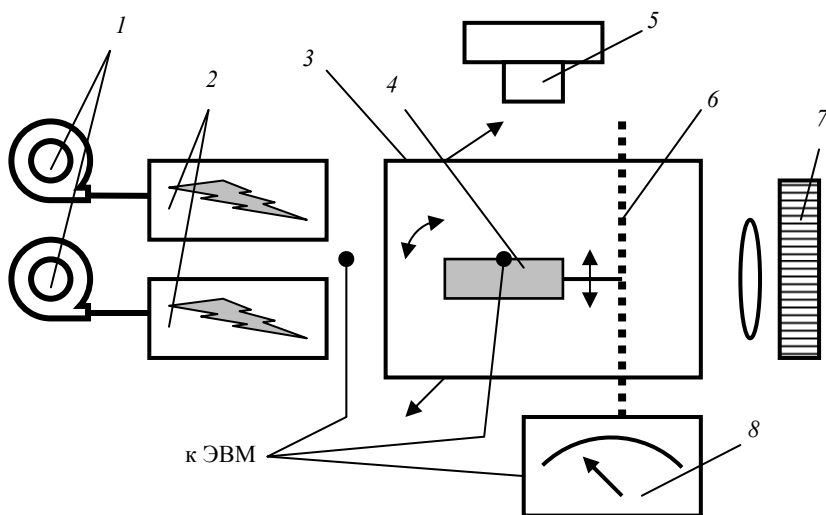


Рис. 2.4. Схема экспериментальной сушильной установки для сушки капель на подложках:

1 – вентиляторы; 2 – калориферы; 3 – перемещающаяся царга; 4 – подложка; 5 – макрофото/видеокамера; 6 – устройство позиционирования подложки в царге; 7 – катетометр; 8 – динамические весы

Подложка монтируется на специальную подставку, закрепляемую в определенном положении (положение подложки в процессе эксперимента можно изменять). Фотография нанесенной капли на смонтированную подложку представлена на рис. 2.5.

Для измерения температуры сушильного агента и температуры высушиваемого продукта используются термопары ХК диаметром 0,1 и 0,2 мм. Термопары подключаются к многоканальному электронному самописцу «Термодат». Температура поверхности высыхающей капли измеряется пирометром.

Для измерения убыли веса материала в процессе сушки используются специально разработанные динамические весы.

Визуальное наблюдение поверхности высыхающей капли и измерение ее размеров производится либо в проходящем, либо в отраженном свете через катетометр, скоростную видеокамеру или фотоаппарат с макрорежимом.

Для корректного исследования кинетики сушки капли на подложке только кондукцией необходимо исключить возможность теплоподвода конвекцией от нагретой поверхности. Такая погрешность всегда имеется при использовании нагретой поверхности площадью, большей, чем площадь контакта капли с подложкой.

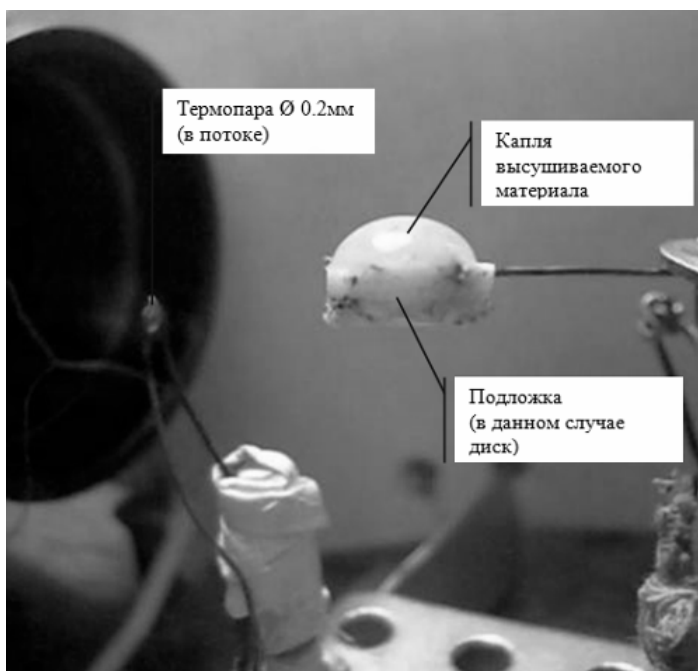


Рис. 2.5. Капля жидкости, высушиваемой на подложке
(по данным работы [183])

В этом случае всегда возникает дополнительный теплоподвод, искажающий механизм процесса сушки. Это особенно характерно для продуктов, склонных к структурообразованию.

Для того чтобы исключить подобный эффект, была разработана визуальная экспериментальная установка для сушки на подложке капли жидкости только кондукцией. Схема установки представлена на рис. 2.6. Схема тепловыделяющего элемента представлена на рис. 2.7. Материал тепловыделяющего элемента – медь. Диаметр цилиндра – 7 мм. Длина цилиндра 150 мм. Источник тепла – нихромовая проволока диаметром 0,85 мм. В торцевой поверхности тепловыделяющего цилиндра установлена термопара, подключаемая к схеме управления. Торцевая поверхность цилиндра и подложки шлифуется для минимизации стоков тепла в соединении подложка–тепловыделяющий элемент.

Схема управления позволяет устанавливать мощность тепловыделения до 1 кВт и температуру поверхности до 300 °С. Выход на заданный режим происходит в течение 10...15 мин в зависимости от заданной температуры поверхности подложки.

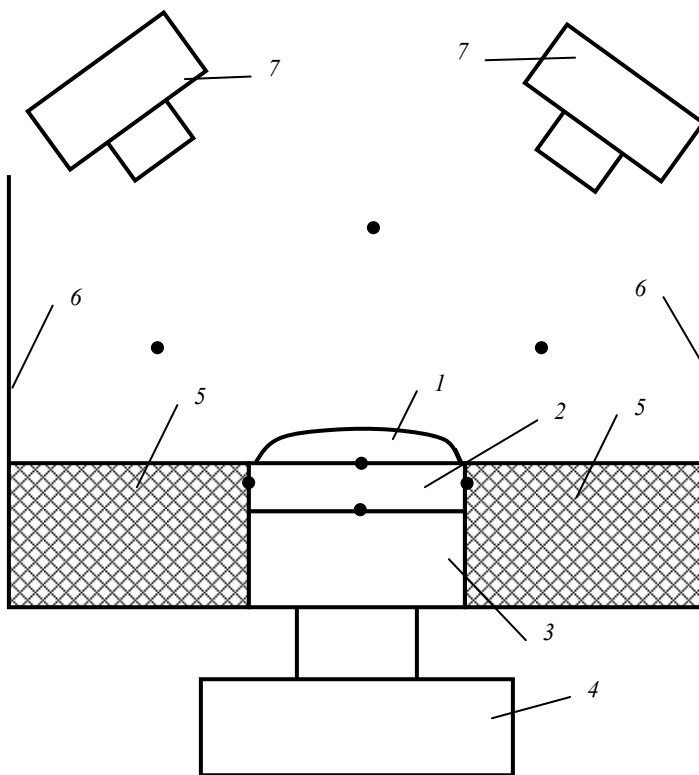


Рис. 2.6. Экспериментальная установка для исследования кинетики сушки капель жидких дисперсных продуктов на подложках при кондуктивном теплоподводе:
1 – капля; 2 – подложка; 3 – тепловыделяющий элемент; 4 – схема управления; 5 – теплоизоляция; 6 – защитный экран; 7 – возможные положения фото-, видеокамеры; точки – места установки термопар

Подложка может сниматься и, следовательно, можно использовать материал с заданной теплоемкостью и теплопроводностью. Форма подложки – диск диаметром 7 мм. В нижней и верхней плоскостях подложки устанавливается термопара ХК диаметром 0,1 мм. Толщину диска можно варьировать от 2 до 20 мм.

Контроль за температурами в заданных точках установки осуществляется с помощью термопар ХК толщиной 0,1 мм. Термопары подключены к электронному многоканальному самописцу «Термодат».

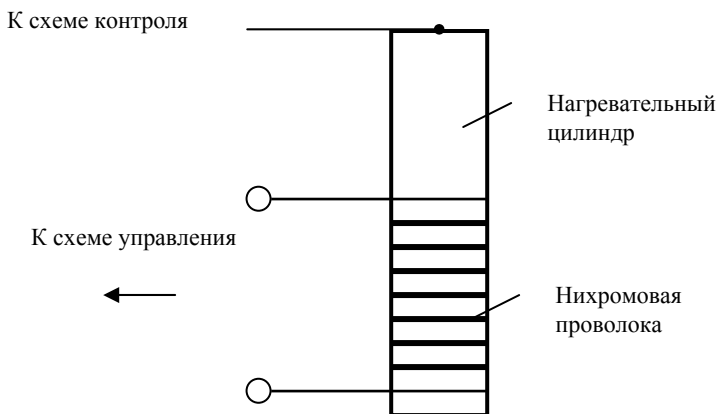


Рис. 2.7. Схема тепловыделяющего элемента

Установка для работы помещается в лабораторную вытяжную камеру с закрытыми вентиляционными задвижками и защитными экранами. Нанесение заданного количества жидкости на подложку осуществляется капельным дозатором.

В установке, представленной на рис. 2.3, мы использовали теплопровод излучением, однако в ней излучатель был жестко закреплен над высушиваемым образцом. Для исследования кинетики сушки капель жидких дисперсных продуктов на подложках с теплопроводом только излучением была создана установка с возможностью регулирования положения и мощности излучателя. Схема установки представлена на рис. 2.8.

Установка представляет собой шкаф 1 с зачерненными внутренними поверхностями. Наружная поверхность шкафа теплоизолирована с целью избежать возможности ожогов о поверхность. В процессе проведения эксперимента шкаф закрывается крышкой.

Внутри шкафа на траверсе динамических весов 3 установлена подложка 2 с нанесенным слоем или каплей высушиваемой жидкости. Траверса динамических весов состоит из двух составных частей, включающих перегрев рабочей поверхности весов.

Излучатель 4 устанавливается в заданное положение с помощью специальных штативных держателей. Использовались излучатели типа ECS1 с длиной волны 2,9 мкм, температурой 700...730 °С, мощностью 1 кВт.

Контроль температур осуществляется с помощью термопар ХК диаметром от 0,1 мм (для подложки) до 1 мм для свободного пространства и стенок установки. Термопары подключены к электронному многоканальному самописцу «Термодат».

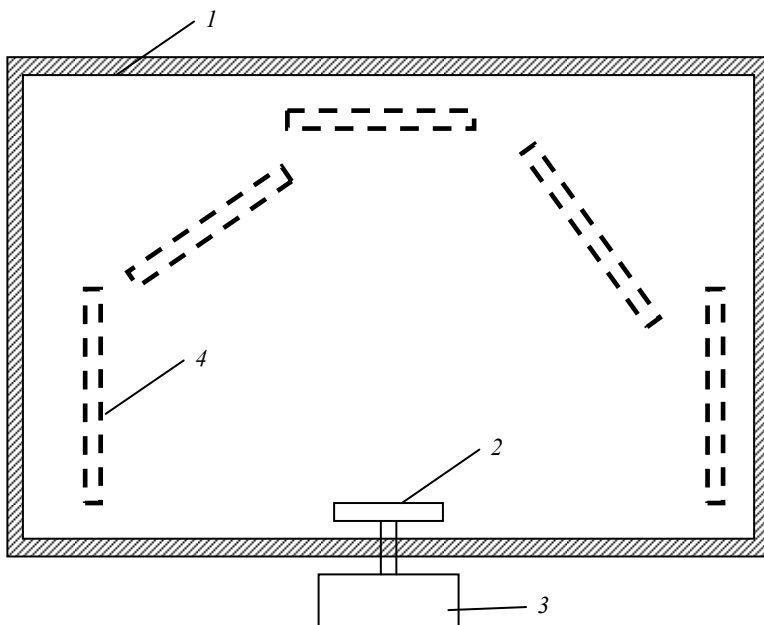


Рис. 2.8. Схема экспериментальной установки для изучения кинетики сушки капель жидких дисперсных продуктов на подложках с теплоподводом только излучением:

1 – шкаф; *2* – подложка; *3* – весы; *4* – возможные положения теплоизлучателя

При отладке экспериментальных установок возник вопрос о влиянии на измерения температуры с помощью термопар различных внешних факторов, таких как электромагнитные помехи, сток/подвод тепла по термопарным проводам и т.п. Для изучения влияния этих факторов нами были созданы некоторые экспериментальные установки.

Учитывая малый объем испаряемой на подложке капли, при наладке установки возник вопрос о величине погрешности, вносимой внешними полями (температурными, электростатическими, низкочастотными полями переменного тока), при измерениях температур в различных точках установки и в высушиваемом образце. Корректное экспериментальное определение температуры высушиваемой капли очень важно при анализе качества получаемого продукта [139, 159, 163].

Для определения величины погрешности нами была создана установка, имитирующая (в сходных с экспериментальной установкой условиях) тепловое, магнитное и электростатическое воздействие на термопару.

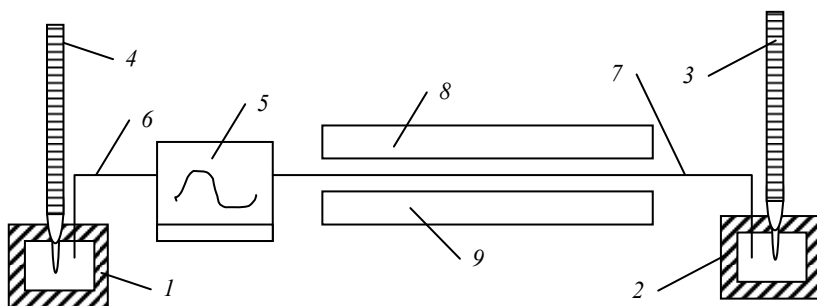


Рис. 2.9. Схема экспериментальной установки:

- 1, 2 – термостатированные сосуды; 3, 4 – эталонные термометры;
 5 – электронный самописец; 6 – контрольная термопара;
 7 – исследуемая термопара; 8, 9 – излучатели

Для испытания были взяты две термопары ДТПЛ011-0.5/5 (исследуемая T_x и контрольная T_k) и контрольный поверенный (эталонный) термометр T_s с ценой деления $0,1\text{ }^\circ\text{C}$.

Схема установки представлена на рис. 2.9. В качестве регистратора данных использовался электронный самописец Термодат-17Е3. Длина контрольной и исследуемой термопар составляла 3 м.

Предварительно были проведены контрольные замеры температур воздуха (свежий воздух $20,2\text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность 35%, атмосферное давление 1010 mb (измерения проводились цифровой метеостанцией Oregon Scientific WMR88)) и дистиллированной воды при отсутствии внешних воздействий на исследуемую термопару.

Полученные значения температур представлены в табл. 2.2 и 2.3.

2.2. Измерение температуры воздуха при отсутствии внешних воздействий на исследуемую термопару, $^\circ\text{C}$

T_s	20,4	30,8	40,0	50,8	66,4
T_k	20,3	30,7	39,9	50,7	66,3
T_x	20,2	30,6	39,8	50,6	66,2

2.3. Измерение температуры воды при отсутствии внешних воздействий на исследуемую термопару, $^\circ\text{C}$

T_s	20,6	35,3	50,3	83,4	99,5
T_k	20,5	35,1	50,2	83,2	99,5
T_x	20,4	35,1	50,1	83,1	99,5

Как видно из данных табл. 2.2 и 2.3, при отсутствии внешних воздействий разница значений показаний исследуемой и контрольной термопары и эталонного термометра составляет не более 0,7...1,0%. Отметим, что максимальная разница показаний контрольного термометра и исследуемой термопары составляет не более 0,2 °С, а контрольной термопары и исследуемой – не более 0,1 °С.

Для исследования влияния низкочастотных полей переменного тока промышленной частоты был включен излучатель 8 (рис. 2.9), создающий по длине контрольной термопары поле переменного тока частотой не более 50 Гц. Данные замеров температур воздуха в термостатируемых сосудах контрольной и исследуемой термопарами и эталонного термометра представлены в табл. 2.4.

Для исследования влияния электростатических полей был включен излучатель 9 (рис. 2.9), создающий по длине контрольной термопары электростатическое поле напряженностью не выше 30 кВ/м. Данные замеров температур воздуха в термостатируемых сосудах контрольной и исследуемой термопарами и эталонного термометра представлены в табл. 2.5.

Для исследования влияния теплового воздействия на исследуемую термопару воздух в рабочей камере установки был нагрет до температуры 200 °С. Данные замеров температур воздуха в термостатируемых сосудах контрольной и исследуемой термопарами и эталонного термометра представлены в табл. 2.6.

Разница между показаниями контрольных датчиков и исследуемой термопары составляет не более 2,4%. Таким образом, можно утверждать, что влияние внешних воздействий на показания термопар (в условиях эксплуатации разработанных сушильных установок) незначительно.

2.4. Данные замеров температуры при воздействии на исследуемую термопару переменного магнитного поля, °С

T_s	20,9
T_k	20,8
T_x	20,4

2.5. Данные замеров температуры при воздействии на исследуемую термопару электростатического поля, °С

T_s	20,9
T_k	20,8
T_x	20,2

2.6. Данные замеров температуры при воздействии на исследуемую термопару теплового поля, °С

$T_э$	20,9
$T_к$	20,8
T_x	20,3

Особенностью исследований тепловых и массообменных процессов, протекающих при сушке капель жидких дисперсных продуктов на подложках, является необходимость корректного учета любых внешних воздействий на высушиваемый образец. Это связано с тем, что на малом объеме испаряемой жидкости даже незначительные явления будут зачастую оказывать определяющее воздействие. Наличие дополнительного теплового потока (например, внешнее излучение на поверхность испаряющейся капли) приводит к изменению типа кинетической кривой сушки.

Основным способом регистрации температуры на границе контакта подложки и испаряющейся капли является применение термопар. В наших исследованиях хорошо себя зарекомендовавшими оказались термопары ХК с диаметром проводов 0,1 мм. На используемой нами экспериментальной сушильной установке, позволяющей производить сушку капель в диапазоне температур от 20 до 250 °С (при естественной конвекции и наличии обдува со скоростью потока до 15 м/с), были получены все типы кинетических кривых сушки, характерных для жидких дисперсных продуктов. Для корректного анализа кинетики сушки капель жидких дисперсных продуктов необходимо учесть величину внешних тепловых потоков, таких как излучение и теплоподвод со стороны контрольных датчиков (в нашем случае термопарных проводов) [139].

Оценку величины теплоподвода со стороны термопарных проводов производили на разработанной установке оценки влияния теплоподвода со стороны термопарных проводов на кинетику нагрева малых подложек, схема которой представлена на рис. 2.10.

Термопарные провода подключались к электронному самописцу. Дополнительно замер температуры поверхности нагреваемой подложки ведется с помощью пирометра.

Для оценки величины теплоподвода со стороны проводов термопары на заданном режиме производили два эксперимента, в ходе которых получали кривую нагрева подложки. В первом эксперименте производился нагрев подложки l потоком сушильного агента с заданной

температурой, выходящим из основного сопла обдува 5. Во втором эксперименте производился нагрев подложки 1 потоком сушильного агента с заданной температурой, выходящим из основного сопла обдува 5, с параллельно включенными дополнительными соплами 4, нагревающими термопарные провода (при этом температура потока из сопла 4 может задаваться либо равной, либо отличной от температуры сопла 5).

По результатам совместного анализа температурных кривых, полученных в первом и втором экспериментах, делался вывод о величине дополнительного теплоподвода. При учете дополнительного теплоподвода в форме эффективного коэффициента теплоотдачи значение притока тепла к нагреваемой подложке от термопарных проводов не превышало 3% от основного теплового потока (в исследованных нами диапазонах температур и скоростей обдува).

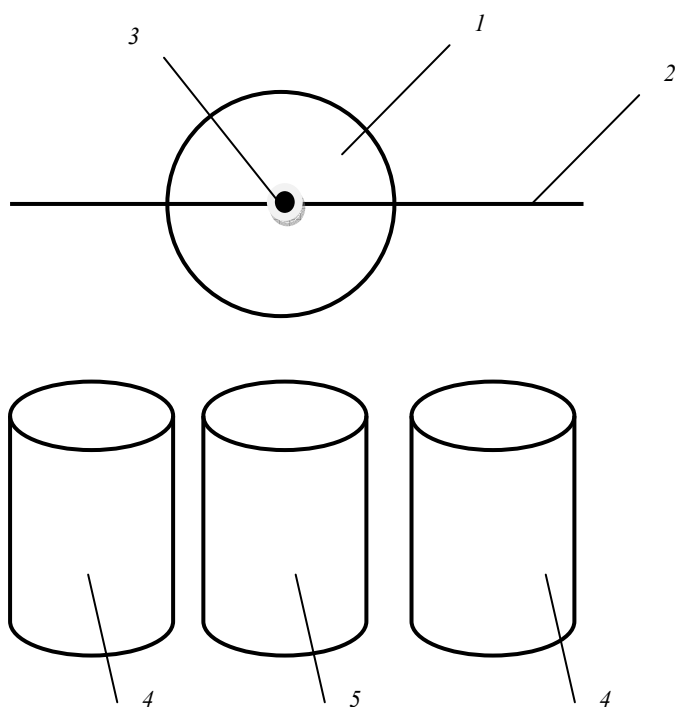


Рис. 2.10. Схема установки для определения величины теплоподвода со стороны термопары:

1 – подложка; 2 – провод термопары; 3 – спай термопары;
4 – дополнительные сопла; 5 – основное сопло

Отдельно необходимо отметить возможность фиксирования кривой сушки в процессе проведения эксперимента. Подобные устройства уже успешно применялись в сушильных исследованиях, проводимых в научной школе проф. В. И. Коновалова [118, 171, 181, 183]. В нашем исследовании особенностью применения подобного устройства является возможность фиксирования малого веса испаряющейся капли, для чего была модернизирована электрическая схема весов и применены аэродинамические формы траверсы весов оригинальной конструкции [171].

Для изучения фракционного состава исследуемых жидких дисперсных продуктов использовался лазерный анализатор частиц Microsizer 201.

Для изучения форм и размеров частиц дисперсной фазы в исследуемых жидкостях использовались оптические микроскопы типа МБИ-1, МБИ-2 и цифровой микроскоп DNT DigiMicro 2.0 [135].

В процессе проведения исследований по кинетике сушки жидкой послеспиртовой барды (по решению проблемы утилизации жидкой послеспиртовой барды в связи с требованиями Федерального закона от 21 июля 2005 г. № 102-ФЗ) появилась задача, связанная с «зарастанием» стенок теплообменной аппаратуры, применяемой на спиртовом заводе, продуктами переработки барды. По классической технологии переработки барда центрифугируется, упаривается и высушивается. Стадии выпаривания барды являются наиболее критичными с точки зрения формирования загрязнений на поверхности теплообмена. Традиционно применяемые пластинчатые теплообменники и выпарные аппараты очень быстро забиваются твердыми, трудно отделяемыми от поверхности отложениями. Это приводит к повышенным энергетическим затратам стадии сушки и уменьшению производительности всего предприятия в целом [169].

Так же проблему представляют теплообменные поверхности и трубопроводы для перекачивания горячих (температуры $>40...50$ °С) жидких продуктов (сироп, фильтрат) с выпарных установок, теплообменников и сушилок, которые активно покрываются слоем твердой фазы, ухудшающей процесс теплообмена и увеличивающей гидравлическое сопротивление аппарата. Образующийся слой загрязнений характеризуется определенной толщиной, твердостью, величиной термического сопротивления. Если характеристики слоя загрязнения незначительно влияют на работу теплообменной аппаратуры, то, как правило, очистка аппаратуры производится редко (в зависимости от регламента). Однако работа теплообменного оборудования с веществами, склонными к образованию сложных, неоднородных загрязнений, сопряжена с необходимостью внеплановой остановки производства и очистки оборудования [150 – 156].

Для исследования проблемы формирования отложений в технологических аппаратах необходимы специальные экспериментальные установки, имитирующие работу типовых теплообменных поверхностей.

Для изучения кинетики формирования подобных отложений и анализа их свойств нами была разработана *экспериментальная установка для изучения кинетики формирования отложений на стенках тепло- и массообменных аппаратов*, схема которой представлена на рис. 2.11 [169].

В установке предусмотрен монтаж элемента теплообменной трубки 3 реального аппарата диаметром от 21 до 25 мм. Трубка герметизируется в кожухе 7 с помощью специальных муфт с уплотнением.

Для создания в установке заданного гидродинамического режима обтекания теплоносителем внешней поверхности теплообменной трубки используется пропеллерная мешалка 1, установленная горизонтально.

Температуру теплоносителя внутри кожуха установки задает электрический нагреватель 4 с помощью электронного регулятора 5.

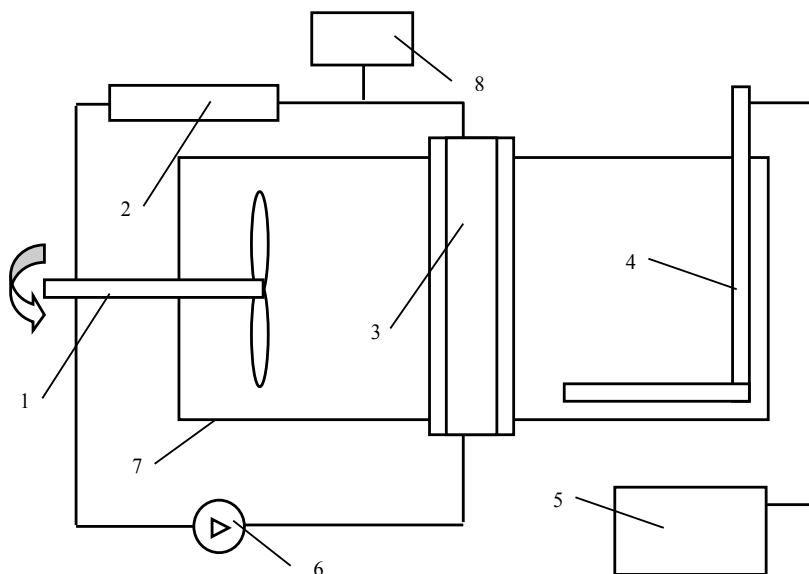


Рис. 2.11. Схема экспериментальной установки для изучения кинетики формирования отложений

Внутри теплообменной трубки протекает теплоноситель, подаваемый с заданной скоростью с помощью насоса 6. Температуру теплоносителя устанавливают с помощью спирального нагревателя 2.

Диапазон температур теплоносителей внутри кожуха и в теплообменной трубке составляет от 20 до 100 °С, что соответствует рабочему диапазону температур, используемому в выпарных установках под вакуумом.

В качестве теплоносителя в установке внутри кожуха и теплообменной трубки используется вода, жидкая послеспиртовая барда, сироп жидкой послеспиртовой барды и фильтрат жидкой послеспиртовой барды.

Порядок проведения эксперимента следующий. На чистой теплообменной трубке измеряют внутренний и наружный диаметры. Трубку монтируют внутрь кожуха 7.

В установку заливается изучаемый теплоноситель, например жидкая послеспиртовая барда. При этом изучаемый теплоноситель заливается либо внутрь кожуха, либо в систему внутри теплообменной трубки через расширитель 8 в зависимости от задачи исследования.

Предварительно определяются теплофизические свойства теплоносителя.

Включаются мешалка 1 на заданное число оборотов и нагреватель 4. С помощью регулятора 5 устанавливается заданная температура. Включается насос 6. Устанавливается заданная температура внутри теплообменной трубки с помощью регулируемого нагревателя 2. Установка работает в течение заданного времени. Исходя из опыта эксплуатации установки минимальное время работы установки 8 ч. Максимальное время работы установки 24 ч. Возможна остановка работы установки с дальнейшим продолжением.

По окончании работы установки теплоносители сливаются. Определяются теплофизические свойства исследуемого теплоносителя. Теплообменная трубка извлекается из кожуха. Производится замер толщины полученного на поверхности трубки отложения. Отдельно проводятся микроскопические наблюдения поверхности отложения и измеряется величина твердости отложения и адгезии отложения к поверхности трубки в целях выявления эффектов структурирования дисперсной фазы теплоносителя на поверхности и в объеме отложения [170].

Дальнейшим развитием установки для исследования кинетики загрязнений теплообменной аппаратуры является созданная нами установка, схема которой представлена на рис. 2.12.

Для анализа кинетики образования загрязнений на поверхности теплообмена во внутренний контур установки заливается жидкая по-

спиртовая барда. Во внешний контур заливается нагревающий теплоноситель (вода или масло). Электронагреватель обеспечивает нагрев теплоносителя до 150 °С. Скорость течения теплоносителя вдоль поверхности теплообмена задается насосом и регулирующим вентилем. Во внутреннем контуре установлена мешалка с регулируемым числом оборотов, задающая определенную степень перемешивания.

Длительность работы установки может достигать нескольких часов. Температуры теплоносителей в контурах и на поверхностях теплообмена контролируются с помощью термодатчиков, подключенных к многоканальному электронному самописцу. Толщина полученного слоя отложений измеряется микрометром. По окончании эксперимента слой отложения удаляется с поверхности теплообмена для теплофизического и химического анализа.

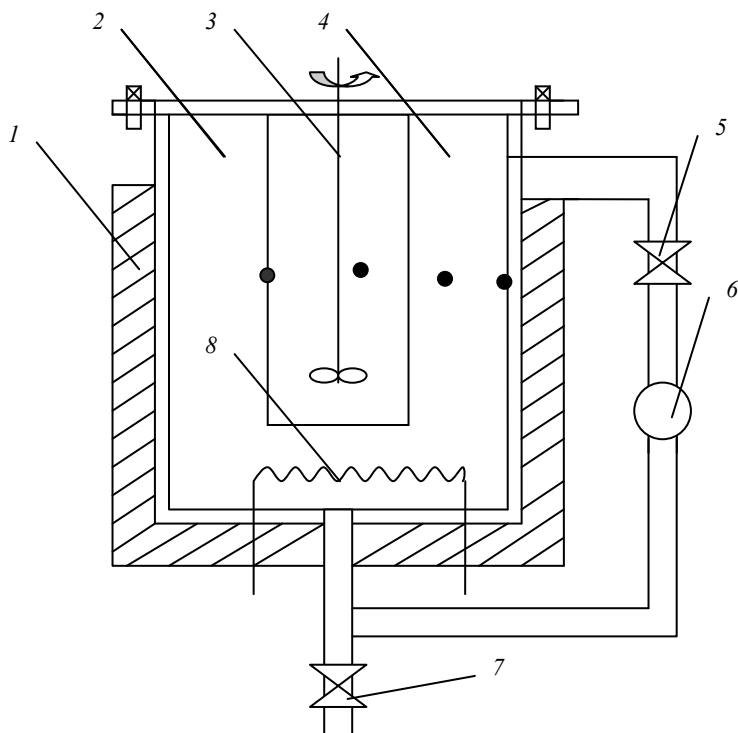


Рис. 2.12. Схема экспериментальной установки

- 1 – теплоизоляция; 2 – внешний контур; 3 – мешалка; 4 – внутренний контур;
 5 – регулирующий вентиль; 6 – насос; 7 – сливной вентиль;
 8 – электронагреватель (точки – места контроля температуры)

2.2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ

Для моделирования кинетики сушки жидких дисперсных продуктов необходимо знание основных теплофизических свойств продукта и его дисперсный состав. Для изучения характера форм частиц и размеров дисперсной фазы использовали микроскопические наблюдения с использованием оптического и цифрового микроскопов. Дисперсный состав исследованных жидких продуктов (барды и мясо-костной жидкости) определяли методом лазерной гранулометрии на лазерном анализаторе размеров частиц MicroSizer 201.

К продуктам, хорошо структурирующимся в процессе сушки, отнесем те жидкие дисперсные продукты, в процессе сушки которых на поверхности и/или в объеме высушиваемого материала формируется определенная структура: пленка, корка, влияющая на кинетику сушки. Приведем результаты исследования свойств двух характерных жидких дисперсных продуктов, склонных к структурообразованию в процессе сушки: жидкая послеспиртовая барда и жидкий пластификатор бетона.

Жидкая послеспиртовая барда

Микроскопические исследования

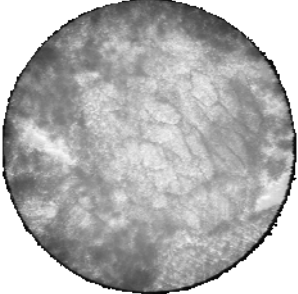
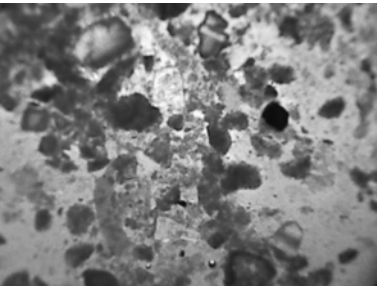
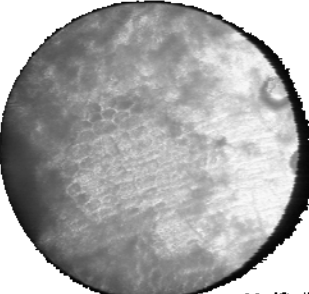
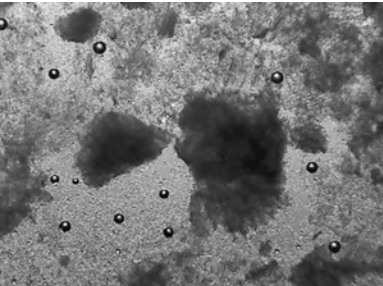
В основном в настоящее время пищевой этиловый спирт производят из смеси пшеницы и ржи (в дальнейшем зернового сырья) и кукурузы. Как показала практика утилизации барды по классической схеме (выпаривание + сушилки), скорость роста отложений барды на стенках тепловой аппаратуры, величина адгезии этих отложений и как следствие, простота очистки оборудования сильно зависят от сырья, из которого получена барда. Как показали наши измерения, в процессе переработки на производстве практически не меняется кислотность барды, фильтрата и сиропа. Она составляет $\text{pH} = 4,0 \dots 4,2$. Концентрация сухих веществ в исходной барде примерно $7 \dots 10\%$. Концентрация сухих нерастворимых веществ в фильтрате $0,2 \dots 1,0\%$. Концентрация сухих растворимых веществ в фильтрате от 2 до 4%. Концентрация сухих веществ в сиропе (жидкость выходящая с третьего корпуса выпарной установки) примерно $28 \dots 30\%$.

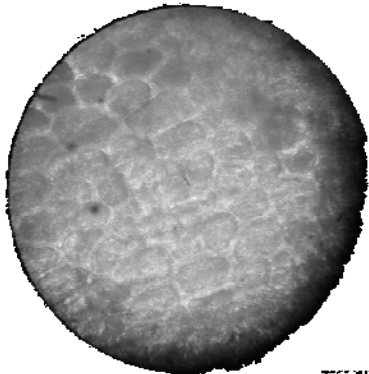
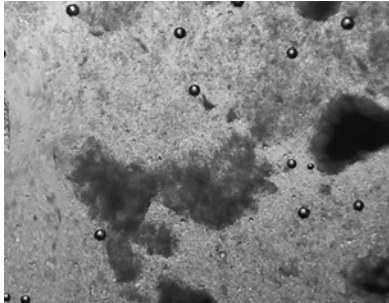

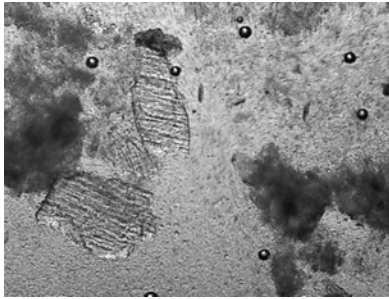
Соответственно, для дальнейшего анализа кинетики процесса сушки жидкой послеспиртовой барды и объяснения наблюдаемых поверхностных структурных явлений необходимо выявление характера дисперсного состава зерновой и кукурузной барды.

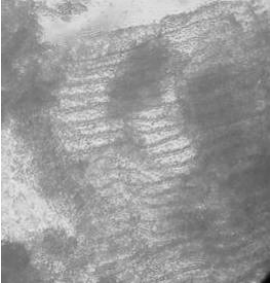

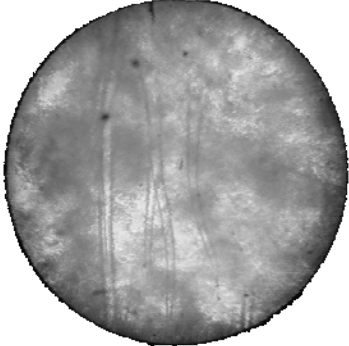
Нами были произведены микроскопические исследования жидкой барды различного происхождения и получающихся из нее в процессе утилизации на производстве полупродуктов (сироп, фугат, кек) [167].

Микроскопические наблюдения производились с помощью оптического микроскопа, позволяющего проводить наблюдения как в проходящем, так и в отраженном свете (с возможностью использования поляризационных фильтров) с увеличением от $\times 50$ до $\times 300$. Результаты микроскопического анализа для зерновой и кукурузной барды представлены в табл. 2.7.

2.7. Результаты микроскопического анализа проб зерновой и кукурузной барды

Зерновая барда	Кукурузная барда
 <p data-bbox="165 794 544 911">Наблюдаются достаточно крупные частицы (неправильной формы) размером до 0,1 мм (увеличение $\times 120$)</p>	 <p data-bbox="575 794 947 911">Наблюдаются достаточно крупные частицы размером до 0,10...0,15 мм (неправильной формы) (увеличение $\times 20$)</p>
 <p data-bbox="165 1241 544 1422">Достаточно часто встречаются упорядоченные структуры размером до 0,2...0,3 мм, состоящие из отдельных частиц размером от 0,03 до 0,05 мм (ориентировочно) (увеличение $\times 140$)</p>	 <p data-bbox="575 1241 947 1422">Наблюдаются достаточно крупные частицы неправильной формы и множество мелкодисперсных частиц с ориентировочным размером около 0,03 мм (увеличение $\times 200$)</p>




Зерновая барда	Кукурузная барда
 <p data-bbox="208 675 501 730">Структура на фото выше, но при $\times 300$-увеличении</p>	 <p data-bbox="630 675 891 794">В кукурузной барде аналогичных структур не наблюдается (увеличение $\times 200$)</p>
 <p data-bbox="204 1254 505 1406">Иногда встречаются крупные включения – частицы неправильной угловатой формы размером от 0,5 до 1,0 мм</p>	 <p data-bbox="574 1254 947 1406">Аналогичные по форме частицы в кукурузной барде, но меньшего размера (около 0,3...0,7 мм) (увеличение $\times 200$)</p>

Зерновая барда	Кукурузная барда
 <p data-bbox="208 536 499 625">Те же частицы при большем увеличении (увеличение $\times 300$)</p>	 <p data-bbox="613 536 907 625">Те же частицы при большем увеличении (увеличение $\times 350$)</p>
 <p data-bbox="181 1005 526 1126">Присутствуют частицы в виде длинных «нитей» толщиной около 0,03...0,05 мм (увеличение $\times 200$)</p>	<p data-bbox="629 1005 889 1126">В кукурузной барде аналогичных структур нами не наблюдалось (увеличение $\times 200$)</p>

Исходя из анализа форм и размеров частиц жидкой барды различного происхождения, можно сделать вывод о том, что состав дисперсной фазы зерновой барды более неоднороден, чем у кукурузной барды, присутствует больше частиц неправильной формы.

Исследование **фильтрата** зерновой и кукурузной барды (получаемых на производстве) выявило примерную схожесть форм и размеров частиц, присутствующих в жидкой фазе. Данные по микроскопическому анализу фильтрата и сиропа зерновой барды представлены в табл. 2.8.

2.8. Результаты микроскопического анализа проб фильтрата и сиропа зерновой барды

Фильтрат	Сироп
 <p data-bbox="172 611 538 730">Видно, что в фильтрате присутствует малое количество твердой мелкодисперсной фазы (увеличение $\times 60$)</p>	 <p data-bbox="580 611 946 823">Видно, что так же как и в фильтрате, размер частиц твердой мелкодисперсной фазы практически не изменился. Разница составляет только в концентрации твердой фазы (увеличение $\times 140$)</p>
 <p data-bbox="183 1204 527 1417">Размер отдельных частиц мелкодисперсной фракции можно оценить в районе $0,007 \dots 0,008$ мм, а отдельные агломераты этих частиц – в размере $0,05$ мм (увеличение $\times 140$)</p>	 <p data-bbox="591 1204 935 1417">Размер отдельных частиц мелкодисперсной фракции можно оценить в районе $0,007 \dots 0,008$ мм, а отдельные агломераты этих частиц – в размере $0,05$ мм (увеличение $\times 300$)</p>

Исследование дисперсного состава

Для определения размеров частиц, составляющих жидкую барду, и концентрации этих частиц был проведен следующий опыт. Жидкую барду (влажность 90%) центрифугировали. Затем фугат сливали в отдельную пробирку для анализа (образец был назван – **фугат** (содержание сухих нерастворимых веществ от 0,2 до 1,0%)). Оставшийся остаток собирали в отдельную бюксу (образец был назван – **остаток** (влажность от 60 до 70%)). Для контроля соответствия полученных результатов с производственной практикой в отдельную бюксу был набран остаток с центрифуги – **кек** (влажность 72%).

Таким образом, исходная жидкая барда была условно разделена на два компонента – жидкий фильтрат (по микроскопическим наблюдениям – тонкая суспензия) и густой остаток (по микроскопическим наблюдениям – грубая суспензия).

Фотография барды, разделенной на центрифуге, представлена на рис. 2.11.

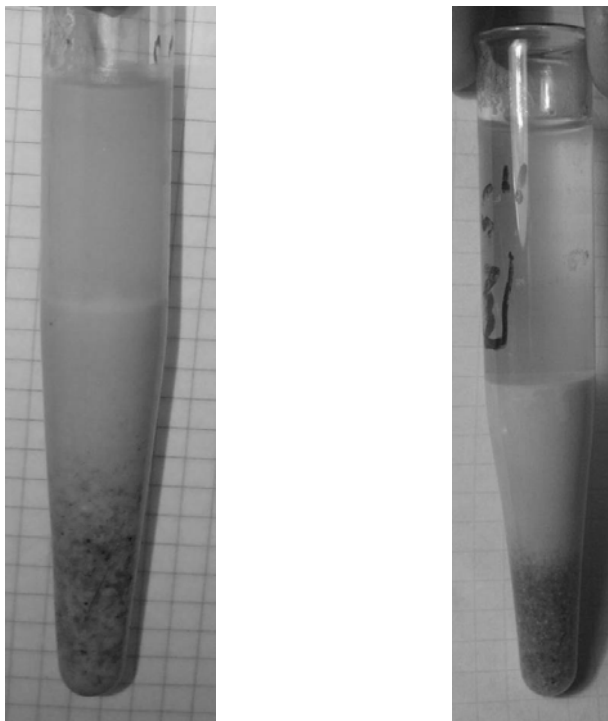


Рис. 2.11. Фотография жидкой послеспиртовой барды, разделенной на центрифуге (слева – кукурузная барда, справа – зерновая барда)

Как видно из опыта, жидкая барда расслоилась на три характерные области: жидкого фугата, мелкодисперсных частиц, крупнодисперсных частиц.

При этом предварительная оценка объема крупнодисперсной фракции составляет примерно 15...18%, объем мелкодисперсной фракции примерно 30...35%, объем фугата примерно 47...55%. Более точная картина характера твердой фазы получена с помощью лазерного анализатора частиц.

Результаты исследований фракционного состава на лазерном анализаторе частиц для зерновой барды представлены на рис. 2.12 – 2.14.

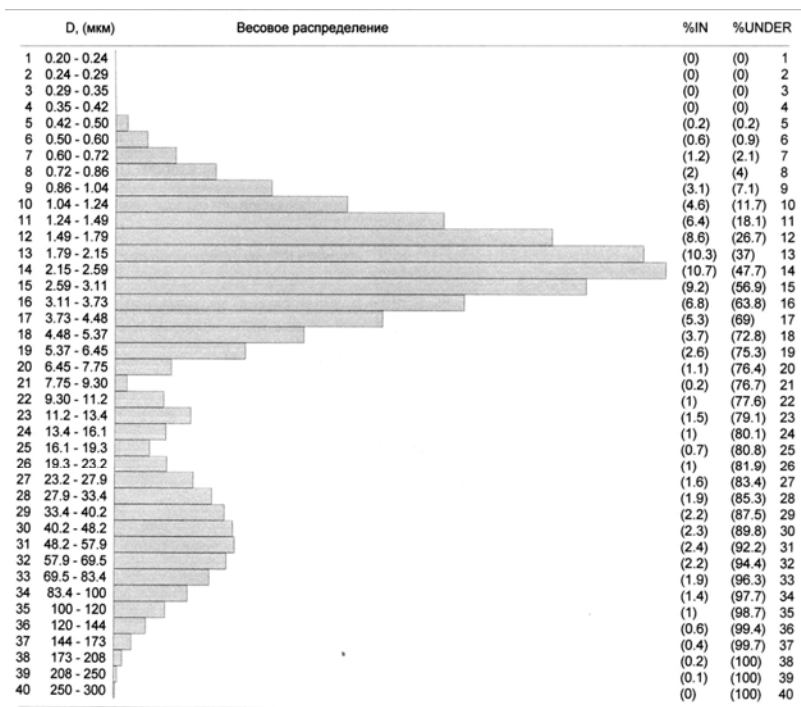


Таблица соответствия размеров частиц (D, мкм) заданным значениям весовой доли

	1.17	1.56	1.91	2.27	2.70	3.35	4.66	15.7	48.8	300
P, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Таблица весовой доли частиц (P, %), соответствующих заданным значениям размеров частиц

	32.6	55.4	71.4	76.9	84.2	90.3	95.9	97.7	99.5	99.9
D, (мкм)	2	3	5	10	30	50	80	100	150	200

В таблицах приводятся значения весовых долей, содержащихся в интервалах размеров меньше указанного диаметра

Рис. 2.12. Весовое распределение и таблицы соответствия размеров частиц, полученных для фугата зерновой барды

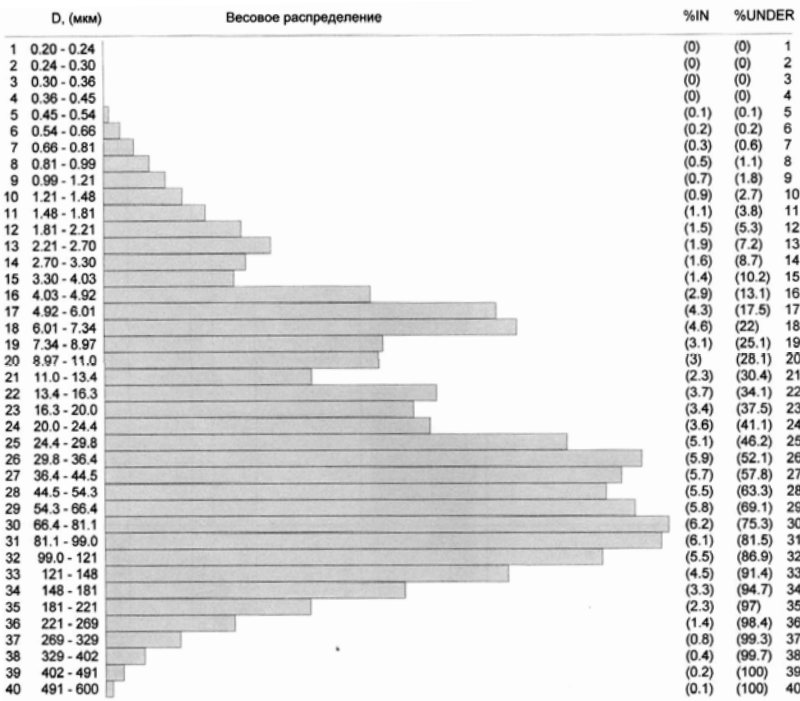


Таблица соответствия размеров частиц (D, мкм) заданным значениям весовой доли

	3.95	6.68	13.0	23.1	33.9	48.2	68.3	94.3	138	600
P, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Таблица весовой доли частиц (P, %), соответствующих заданным значениям размеров частиц

	13.4	26.8	37.5	46.4	67.6	71.2	81.7	96	98.9	100
D, (мкм)	5	10	20	30	63	71	100	200	300	500

В таблицах приводятся значения весовых долей, содержащихся в интервалах размеров меньше указанного диаметра

Рис. 2.13. Весовое распределение и таблицы соответствия размеров частиц, полученных для остатка зерновой барды

Результаты исследований фракционного состава на лазерном анализаторе частиц для кукурузной барды представлены на рис. 2.15 – 2.17.

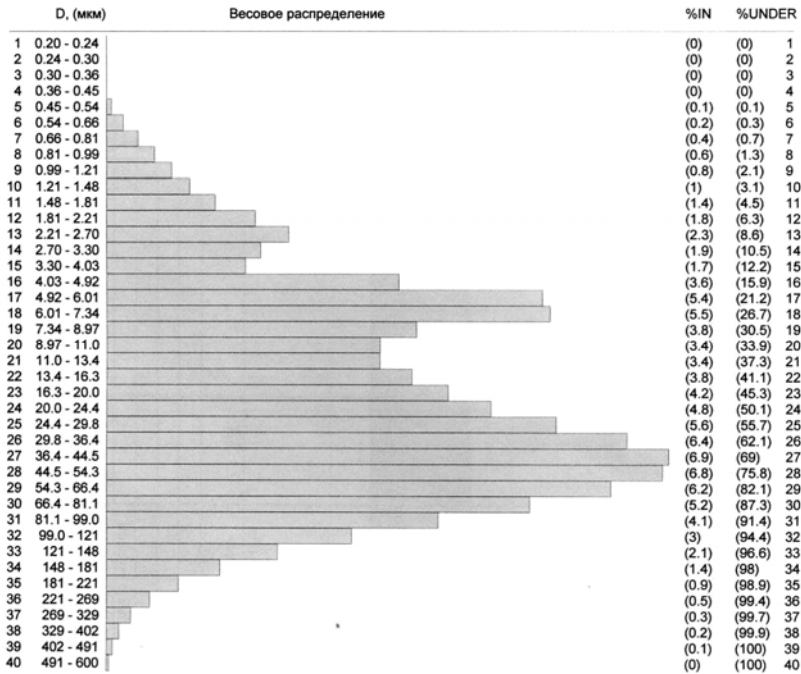


Таблица соответствия размеров частиц (D, мкм) заданным значениям весовой доли

	3.10	5.76	8.68	15.5	24.3	34.2	45.8	61.9	91.9	600
P, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Таблица весовой доли частиц (P, %), соответствующих заданным значениям размеров частиц

	16.2	32.4	45.4	55.9	80.5	83.9	91.6	98.5	99.6	100
D, (мкм)	5	10	20	30	63	71	100	200	300	500

В таблицах приводятся значения весовых долей, содержащихся в интервалах размеров меньше указанного диаметра

Рис. 2.14. Весовое распределение и таблицы соответствия размеров частиц, полученных для кека зерновой барды

Жидкий пластификатор бетона

Нами исследовалась сушка на подложках жидкого пластификатора бетона на основе натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот с добавлением высокомолекулярных фракций. Как указывалось выше, пластификатор – это коллоидный раствор с дисперсионной фазой, являющейся истинным раствором. Поэтому методы микроскопии и лазерного гранулометрического анализа для пластификатора практически не применимы. Для выяснения формы и размеров частиц воспользуемся данными, полученными с помощью методов ИК-спектроскопии и микроэлектронного сканирования [76].

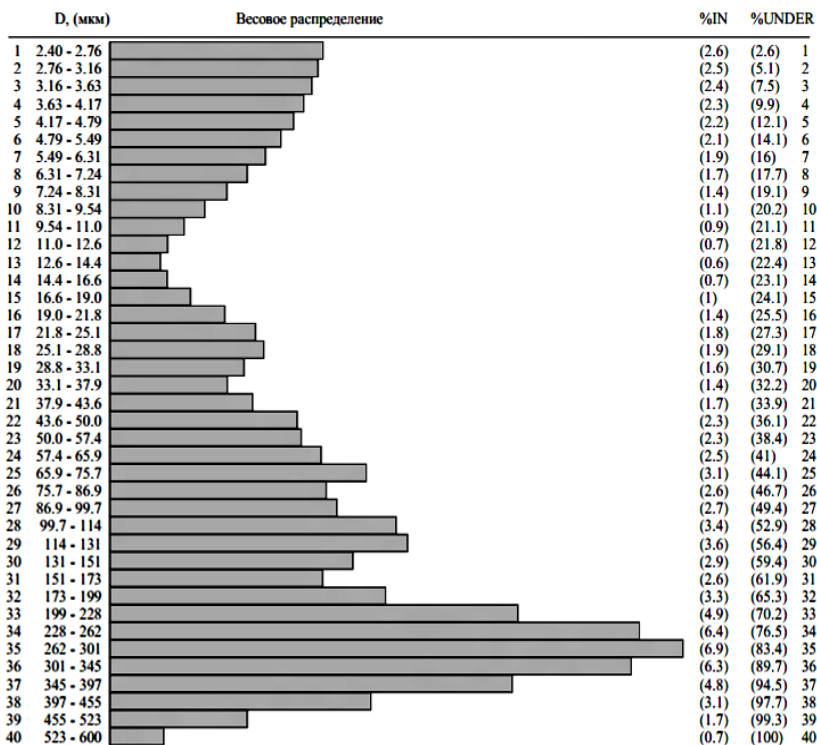


Таблица соответствия размеров частиц (D, мкм) заданным значениям весовой доли

	4.21	9.24	30.9	62.6	102	156	227	281	348	600
P, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Таблица весовой доли частиц (P, %), соответствующих заданным значениям размеров частиц

	9.9	17.7	21.8	25.5	32.2	41	52.9	65.3	89.7	100
D, (мкм)	4.17	7.24	12.6	21.9	38.0	65.9	114	199	345	600

В таблицах приводятся значения весовых долей, содержащихся в интервалах размеров меньше указанного диаметра

Рис. 2.15. Весовое распределение и таблицы соответствия размеров частиц, полученных для исходной кукурузной барды

Молекулярная масса пластификатора (по данным работы [76]) может составлять от 9000 (для низкомолекулярного) до 46 300 (для высокомолекулярного).

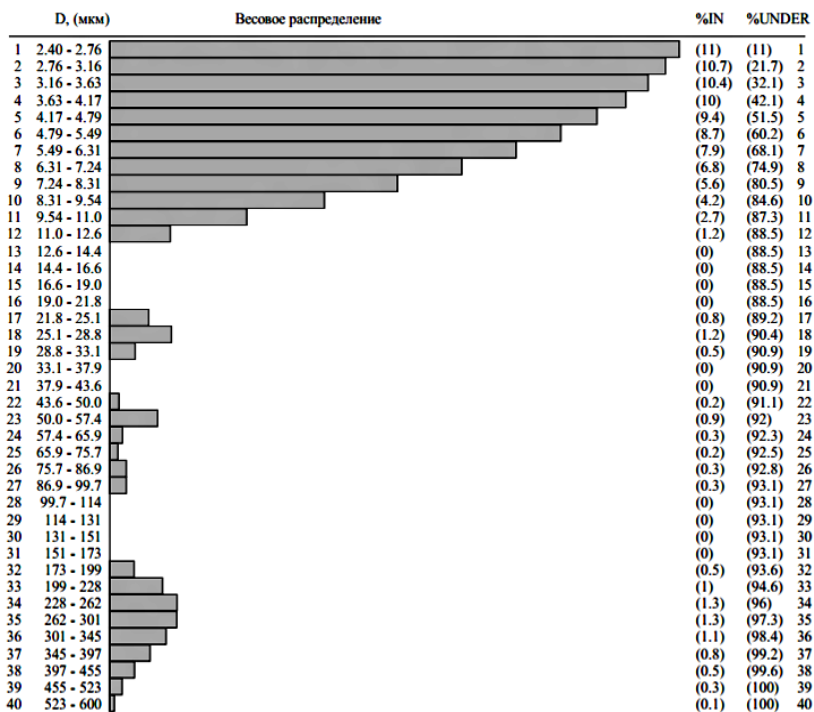


Таблица соответствия размеров частиц (D, мкм) заданным значениям весовой доли

	2.72	3.09	3.53	4.05	4.68	5.47	6.54	8.22	27.6	600
P, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Таблица весовой доли частиц (P, %), соответствующих заданным значениям размеров частиц

	42.1	74.9	88.5	88.5	90.9	92.3	93.1	93.6	98.4	100
D, (μm)	4.17	7.24	12.6	21.9	38.0	65.9	114	199	345	600

В таблицах приводятся значения весовых долей, содержащихся в интервалах размеров меньше указанного диаметра

Рис. 2.16. Весовое распределение и таблицы соответствия размеров частиц, полученных для фильтра кукурузной барды

Размеры и форма частиц твердой фазы (по данным работы [76]) для высокомолекулярных фракций пластификатора состоит преимущественно из вытянутых сферических и дискообразных агрегатов размером до 200 нм. Для низкомолекулярных фракций преобладают более мелкие частицы размером до 60 нм.

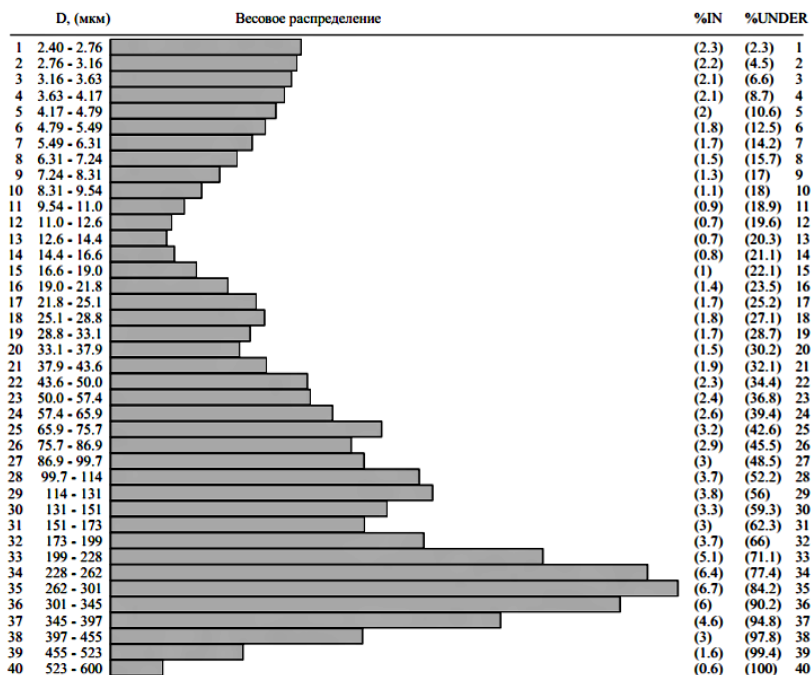


Таблица соответствия размеров частиц (D, мкм) заданным значениям весовой доли

	4.57	13.4	37.0	67.6	106	156	222	276	344	600
P, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Таблица весовой доли частиц (P, %), соответствующих заданным значениям размеров частиц

	8.7	15.7	19.6	23.5	30.2	39.4	52.2	66	90.2	100
D, (мкм)	4.17	7.24	12.6	21.9	38.0	65.9	114	199	345	600

В таблицах приводятся значения весовых долей, содержащихся в интервалах размеров меньше указанного диаметра

Рис. 2.17. Весовое распределение и таблицы соответствия размеров частиц, полученных для кека кукурузной барды

Электронные фотографии частиц низкомолекулярных и высокомолекулярных фракций пластификатора представлены на рис. 2.18 [76].

Плотность жидкого суперпластификатора около 1170...1190 кг/м³. Массовая доля воды в наших экспериментах составляла от 65 до 90%. Величина поверхностного натяжения для пластификаторов на основе полиметиленафталинсульфокислот зависит от концентрации и составляет от 60·10⁻³ до 80·10⁻³ Дж/м².

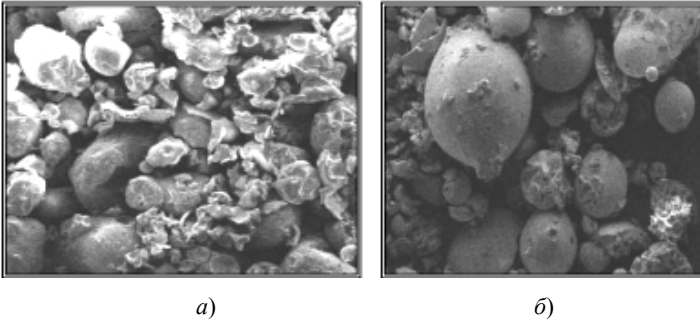


Рис. 2.18. Характерные формы частиц низкомолекулярной (а) и высокомолекулярной (б) фракций

Характер влияния различных параметров на величину поверхностного натяжения для пластификаторов до сих пор дискуссионная тема. Например, есть данные о понижении величины σ на границе газ-жидкость до $(20...30) \cdot 10^{-3}$ Дж/м² [76].

К продуктам, слабо структурирующимся в процессе сушки, отнесем те жидкие дисперсные продукты, в процессе сушки которых на поверхности и/или в объеме высушиваемого материала не формируется определенная структура: пленка или корка. Для таких продуктов возможны явления структурообразования при упаривании исходного продукта перед сушкой, внесении в продукт различных добавок, использования очень жестких режимов сушки.

Мясо-костная жидкость

Мясо-костная жидкость (МКЖ) представляет собой жидкость от коричневого до черного цвета со специфическим запахом. Жидкость получается как отход мясного производства и включает в себя несъедобные отходы и конфискаты от убоя скота. Содержание твердой фазы в жидкости составляет 8...12% (масс.). Исходная жидкость содержит 29,8...30,9% жиров, 27,8% белков, 85 мг/кг пероксидов жиров. В процессе сушки МКЖ получается мука или гель (зависит от применяемого типа сушки) с высоким содержанием протеинов (40...60%). Конечная влажность сухого продукта 1...3%.

Микроскопические исследования

Как было сказано ранее концентрация твердой фазы в МКЖ составляет 8...12%. Для того чтобы оценить размер и форму частиц твердой фазы, были проведены микроскопические исследования исходной жидкости и микроструктуры остатка МКЖ.

На рисунке 2.19 представлена фотография микроструктуры остатка сухой МКЖ на подложке.

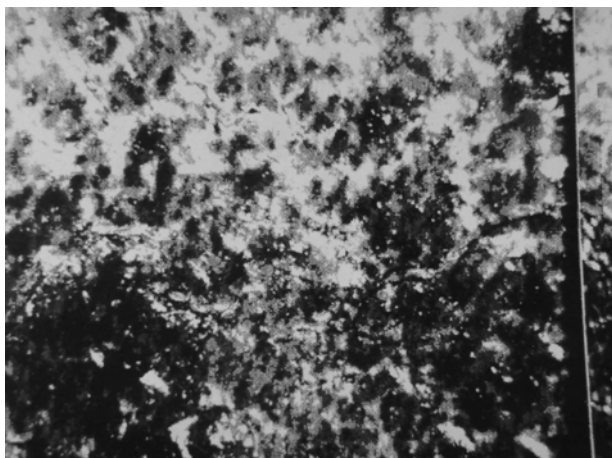
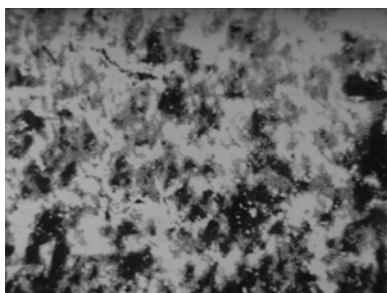
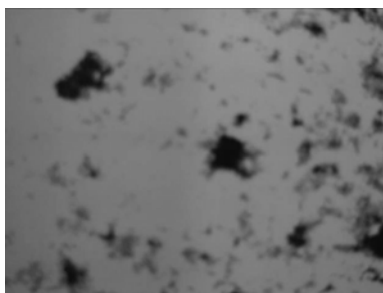


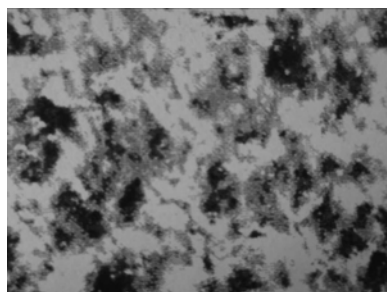
Рис. 2.19 Фотография микроструктуры сухого остатка МКЖ
(увеличение $\times 100$)



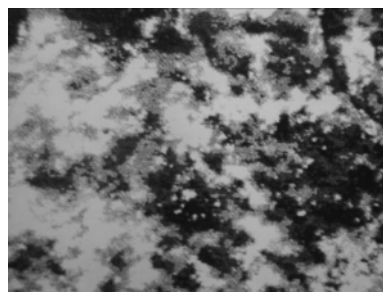
(увеличение $\times 100$)



(увеличение $\times 200$)



(увеличение $\times 70$)



(увеличение $\times 150$)

Рис. 2.20. Микрофотографии дисперсных частиц жидкой МКЖ

Как видно из микрофотографии, основной слой остатка имеет примерно одинаковый по размеру состав частиц, составляющий от 0,10 до 0,25 мм.

На рисунке 2.20 представлены фотографии дисперсных частиц в жидкой МКЖ.

Можно отметить, что в исходной жидкости также присутствуют как более мелкие частицы до 0,025 мм, так и более крупные частицы от 0,3 до 1,0 мм. Крупных и мелких частиц в исходной жидкости и в остатке мало.

Исследование дисперсного состава

Результаты исследования фракционного состава МКЖ на лазерном анализаторе частиц представлены на рис. 2.21.

Теплофизические и структурно-механические свойства МКЖ

Так как теплофизические и структурно-механические свойства мясо-костных бульонов хорошо изучены, то необходимые в расчетах данные определялись самостоятельно и сравнивались с опубликованными литературными данными [181].

1. *Вязкость мясо-костного бульона* может быть получена по формуле

$$\eta = a_1 t^{-a_2}, \quad (2.1)$$

где η – вязкость, Па·с; t – температура, К; a_1, a_2 – эмпирические коэффициенты.

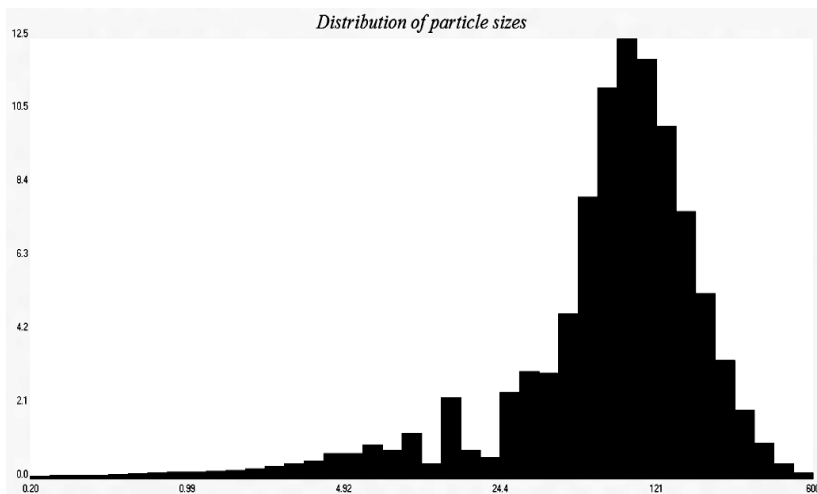


Рис. 2.21. Гистограмма распределения размеров частиц, полученных для МКЖ

Для концентрации твердой фазы $c = 0,05 \dots 0,20$ кг сух. вещ-ва/кг продукта в области температур $40 \dots 90$ °C:

$$a_1 = 0,01905 \exp(19,3c); \quad a_2 = 1,26c + 0,92.$$

2. Плотность мясо-костного бульона

$$\rho_c = \rho_{ct} + ac, \quad (2.2)$$

где ρ_c – плотность бульона с концентрацией c , кг тв./кг; a – эмпирический коэффициент, кг/м³; ρ_{ct} – плотность при фиксированной температуре и $c = 0$.

Для температуры 40 °C

$$a = 300; \quad \rho_{ct} = 992. \quad (2.3)$$

Плотность водно-белковых систем при изменении температуры можно вычислить с помощью коэффициента температурного расширения β_t (1/К), который показывает, на какую величину от первоначального изменится объем системы V (м³) при изменении температуры на 1 К: $\beta_t = (1/V)(dV/dt)$. Если принять β_t постоянным в определенном интервале температур, то

$$\rho_t = \frac{\rho_c}{1 + \beta_t(t - t_c)}. \quad (2.4)$$

Среднее значение β_t для многих водно-белковых систем, в том числе и мясо-костной жидкости, в интервале температур $40 \dots 95$ °C можно принять такое же, как для воды: $56 \cdot 10^{-5}$ 1/К.

Таким образом, при концентрации $c = 0,12$ кг тв./кг и $t = 25$ °C плотность мясо-костного бульона составит $\rho_c = 1036$ кг/м³. Из эксперимента имеем $\rho_c = 1026 \dots 1030$ кг/м³, таким образом, расхождение экспериментальных и расчетных данных составляет 0,77%, что подтверждает возможность применения формул (2.2) и (2.4) и данных (2.3) для расчета плотности мясо-костной жидкости в диапазоне температур $20 \dots 90$ °C.

3. Плотность остатка (мясо-костная мука/гель)

Плотность смеси из нескольких компонентов может быть определена по формуле

$$\rho = \sum_i c_i \rho_i,$$

где c_i – концентрация i -го компонента в смеси.

Таким образом, можно рассчитать плотность остатка

$$\rho_{\text{ост}} = \frac{\rho_{\text{см}} + (c_{\text{ост}} - 1)\rho_c}{c_{\text{ост}}}. \quad (2.5)$$

Плотность кости составляет:

- насыпная от 200 до 800 кг/м³;
- средняя монолита от 1300 до 1900 кг/м³.

Плотность порошка говядины:

- насыпная от 400 до 600 кг/м³;
- средняя монолита ≈ 1340 кг/м³.

Плотность мясо-костной муки насыпная от 610 до 810 кг/м³.

Плотность остатка при наших условиях сушки (на подложках в туннельной сушилке) должна быть больше насыпной (близкой к плотности монолита мяса), так как остаток представляет собой гель. Плотность остатка, рассчитанная по формуле (2.5), составляет 1200...1250 кг/м³. В эксперименте для массы остатка 0,2 г на площади подложки $1,575 \cdot 10^{-3}$ м² высота слоя остатка составляла $\approx 0,1$ мм (замеры катетометром и микрометром). Если оценивать высоту слоя остатка по формуле $h_{\text{ост}} = m_{\text{ост}} / (F\rho_{\text{ост}})$, то для плотности остатка 1250 кг/м³ и условий эксперимента высота остатка составит $\approx 0,1$ мм.

4. Теплоемкость мясо-костного бульона

$$c = 1675 + 25,1W, \quad (2.6)$$

при $W > 26\%$ данная формула справедлива для мяса говядины, баранины, телятины, свинины, птицы.

В то же время существуют данные о зависимости теплоемкости мясных продуктов от жирности:

$$c = 3658 - 25,1Ж, \quad (2.7)$$

где Ж – жирность, %.

Формула (2.7) справедлива в пределах температур 0...50 °С и Ж от 3 до 30%. Для говядины Ж = 3,8...10,5%.

Для МКЖ можно принять $W = 88\%$ Ж = 30%. Таким образом, по формуле (2.6) получим $c = 3883,8$ Дж/(кг·К); по формуле (2.7) получим $c = 2905$ Дж/(кг·К). Если считать теплоемкость дисперсии по воде для двухкомпонентной разбавленной среды ($x < 0,2$) по формуле

$$c = 4190(1 - x), \quad (2.8)$$

то получим $c = 3687,2$ Дж/(кг·К).

Таким образом, можно принять теплоемкость МКЖ от 3600 до 3900 Дж/(кг·К).

5. Теплопроводность мясо-костного бульона

$$\lambda = 0,056 + 0,0057W. \quad (2.9)$$

Формула (2.9) справедлива при $W = 52 \dots 70\%$. При этом жирность не оказывает заметного влияния на значение коэффициента теплопроводности.

6. Теплофизические свойства остатка мясо-костной жидкости на основе говядины приведены в табл. 2.9.

Теплофизические данные по послеспиртовой барде и жидкому пластификатору были определены в лаборатории оценки качества ОАО «Талвис» (г. Тамбов) и лаборатории физико-механических процессов ОАО «Пигмент» (г. Тамбов) и предоставлены нам для дальнейшего использования. Теплофизические свойства мясо-костной жидкости определялись самостоятельно. Сводные данные по основным усредненным теплофизическим свойствам исследованных жидких дисперсных продуктов приведены в табл. 2.10.

2.9. Теплофизические свойства остатка мясо-костной жидкости для порошка говядины также справедливо $\lambda = 0,0568 + 0,0012W$

ε, степень пористости	$\rho_{\text{нас}}$ ($\rho_{\text{монолит}}$)	c	λ	$a \cdot 10^8$
67	442	1472	0,068	10,4
0	1340	1472	0,167	8,4

2.10. Свойства исследованных жидких дисперсных продуктов

Продукт/ Свойства	Плотность ρ , кг/м ³	Вязкость η , мПа·с	Влажность W , %	Теплоемкость c , Дж/кг	pH
Мясо-костная жидкость	1012... 1100	1,05... 1,12	86...90	4100... 4150	6,5...7,5
Послеспиртовая барда	1050... 1120	1,10... 1,15	90...92	4060... 4120	4,0...4,2
Жидкий пластификатор	1185	1,12... 1,15	(65)80... 90	4000... 4100	(8,4)7,0... 9,0

3. КЛАССИФИКАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ СУШКИ

Существуют различные виды классификаций материалов, форм связи влаги, кинетических кривых при сушке. Например, классификации форм связи влаги П. А. Ребиндера; классификация материалов А. В. Лыкова; классификация материалов С. П. Рудобашты по особенностям массопереноса; классификация Б. С. Сажина по анализу внутренней структуры материала и критического радиуса пор; классификации О. Кришера, М. А. Казанского.

Однако для исследования кинетики сушки жидких дисперсных продуктов необходима кинетическая классификация, основанная на виде и особенностях кинетических кривых, формирующихся при сушке и наиболее информативно отражающих механизм процесса.

3.1. КЛАССИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ КАК ОБЪЕКТОВ СУШКИ И КИНЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ

Классической кинетической классификацией является классификация кривых скорости сушки, предложенная А. В. Лыковым [1]. Классификация предназначена для анализа кинетики сушки материалов с твердым скелетом. В классификации выделяют шесть типов кривых скорости сушки (рис. 3.1).

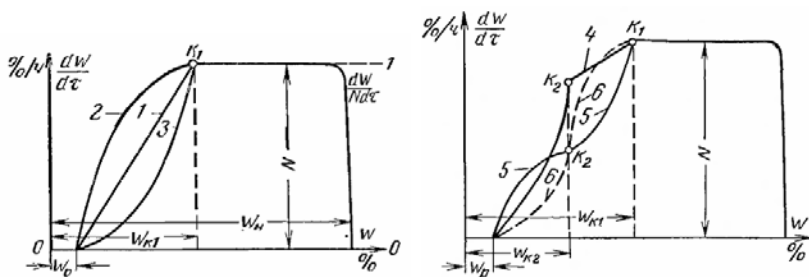


Рис. 3.1. Классификация типов кривых скорости сушки, предложенная А. В. Лыковым

Тип кинетической кривой соотносится с видом материала и способом сушки. Например, кривые типа 1 и 2 наблюдаются при сушке тканей, растянутых на раме, тонких кож, макаронного теста и т.д. Кривые типа 3 наблюдаются при сушке пористых керамических материалов. Кривые типа 4 часто встречаются при сушке глины. Кривые типа 5 – при сушке хлеба.

Существуют более обширные классификации кривых скорости сушки, например предложенная Ван-Брейкелем [181] для сушки паст и гранул, из 12 типов кривых скорости сушки (рис. 3.2).

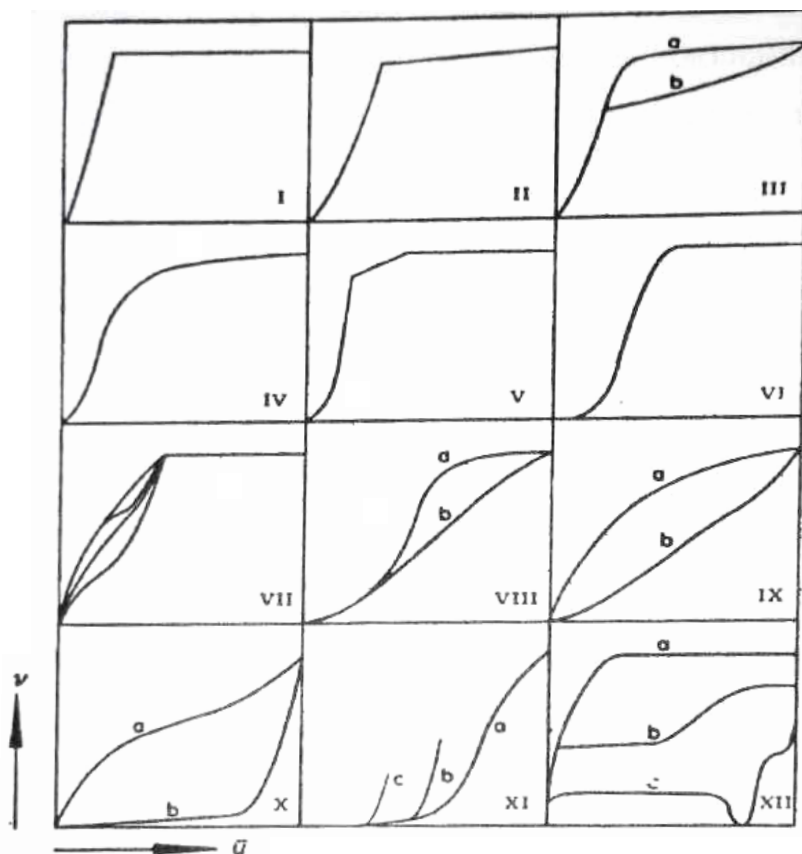


Рис. 3.2. Классификация кривых скорости сушки, предложенная Ван-Брейкелем

Долинским А. А. и Малецкой К. Д. [183] для сушки растворов предложена классификация высушиваемых растворов по четырем типам (для некоторых типов выделены подтипы) в зависимости от степени влияния внутреннего теплообмена на кинетику процесса. Материал классифицируется к определенному типу исходя из соотношений времени прогрева, длительности периодов сушки и явлений структурообразования.

В работе [181] для сушки жидких дисперсных продуктов на подложках впервые была предложена классификация по типу продукта. Классификация получена на основе анализа кинетических особенностей кривых сушки исследованных дисперсий на твердых подложках в широком диапазоне температур сушильного агента, скоростей обдува и начальных концентраций по механизму и кинетике. В основу классификации положена температурная кривая процесса сушки $T(\tau)$. Этот выбор обоснован тем, что температурная кривая предоставляет больше информации о процессе сушки, чем кривая убыли влаги $u(\tau)$ или кривая скорости сушки $N(\tau) = (-du/d\tau)(\tau)$.

Температурные кривые позволяют видеть формирование или вырождение температурных площадок. Основные площадки – это температурная площадка, близкая по значению к температуре мокрого термометра ($T_{м.т} \approx \text{const}$), и температурная площадка, близкая по значению к температуре кипящей воды ($T_{кип} \approx 100^\circ\text{C}$).

Высушиваемые дисперсии были разделены на пять **основных типов** по характеру формирования температурных площадок. Характер формирования площадок напрямую связан с физическими изменениями, происходящими в высушиваемом материале в процессе сушки. Такие явления, как структурирование, кристаллообразование и их комбинации сопровождаются характерными изменениями на температурной кривой $T(\tau)$. Так же на характер формирования площадок влияют режим процесса и тип подложки.

1 тип дисперсий – при сушке на *мягких* режимах **не наблюдается** формирование температурной площадки $T_{м.т}$. Как правило, в подобных материалах в процессе сушки происходит большое объемное структурирование.

2 тип дисперсий – при сушке на любых режимах (*мягкий/жесткий*) **наблюдается** формирование только **одной** температурной площадки, близкой по значению к температуре мокрого термометра $T_{м.т}$. Как правило, подобные материалы не подвергаются структурированию и практически полностью высыхают в первом периоде сушки.

3 тип дисперсий – при сушке на любых режимах (*мягкий/жесткий*) **наблюдается** формирование **двух** температурных площадок: близкой по значению к температуре мокрого термометра $T_{м.т}$ и близкой по значению к температуре кипящей воды $T_{кип}$. Как правило, подобные

материалы в процессе сушки подвергаются среднему поверхностному структурированию при достижении материалом определенной температуры (образование корки, клейстеризация и т.п.) и/или кристаллообразованию.

4 тип дисперсий – при сушке на *жестких* режимах **наблюдается** формирование только **одной** площадки, близкой по значению к температуре кипящей воды $T_{\text{кип}}$. Как правило, подобные материалы в процессе сушки подвергаются большому поверхностному структурированию в начале процесса.

5 тип дисперсий – при сушке на *жестких* режимах **не наблюдается** формирование **ни одной** температурной площадки. Как правило, подобные материалы в процессе сушки подвергаются среднему или большому объемному структурированию в начале процесса.

В таблице 3.1 приведены примеры классификации высушиваемых жидких дисперсных продуктов по механизму и кинетике, а также отмечены наблюдаемые в процессе сушки явления деструкции материала.

3.1. Классификация некоторых высушиваемых жидких дисперсных продуктов

Наименование/ начальная концентрация	1 тип	2 тип	3 тип	4 тип	5 тип	Особенности
1	2	3	4	5	6	7
Мясо-костная жидкость, 10...12%		*				Деструкция остатка при жестких режимах сушки
Мясо-костная жидкость, 35%		* ** ***				Перегиб в районе $T_{\text{м.т}}$ наблюдается при сушке на алюминиевых образцах. Деструкция остатка при жестких режимах сушки
Мясо-костная жидкость, 50%	*			×× ×××		Объемное структурирование в начале процесса сушки. Деструкция остатка при жестких режимах сушки

Наименование/ начальная концентрация	1 тип	2 тип	3 тип	4 тип	5 тип	Особенности
1	2	3	4	5	6	7
Кукурузная жидкость, 10%			* ** xxx			Деструкция остатка при жестких режи- мах сушки
Кукурузная жидкость, 20%			* ** xxx			Деструкция остатка при жестких режи- мах сушки
Кукурузная жидкость, 35%			* ** *** xxx			Перегиб в районе $T_{м.т}$ наблюдается при сушке на алюмиение- вых образцах. Деструкция остатка при жестких режи- мах сушки
Кукурузная жидкость, 50%	*			xx		Объемное структу- рирование в начале процесса сушки. Деструкция остатка при жестких режи- мах сушки
Послеспир- товая барда, 10%		** ***				Деструкция при же- стких режимах
Фильтрат барды, 1%		*				—
Сироп барды, 30%			** *** xx xxx			Деструкция при же- стких режимах
Пластификатор бетона, 10%	*			xx xxx		—

Примечания: * – постоянная $T_{м.т}$ (кроме 1 типа); ** – увеличивающаяся по значению $T_{м.т}$; *** – перегиб в районе $T_{м.т}$; × – постоянная $T_{кип}$; xx – увеличивающаяся по значению $T_{кип}$; xxx – перегиб в районе $T_{кип}$.

Достоинством данной классификации является возможность наглядной оценки характера структурообразования для заданного продукта в разных условиях (режимах сушки) и при изменении начальных свойств продукта (например, начальная влажность).

Основным недостатком является зависимость типа жидкого дисперсного продукта от режима сушки, например, для высококонцентрированных продуктов имеем принадлежность сразу к двум типам.

Для применения классификации типа высушиваемого дисперсного продукта к модели прогноза предлагается несколько изменить представленную классификацию по режимам сушки и выделить следующие типы:

Мягкие режимы (T до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$):

1 тип – при сушке не наблюдается формирование ни одной температурной площадки.

2 тип – при сушке наблюдается формирование температурной площадки $T_{м.т.}$.

Жесткие режимы (T более $100\text{ }^{\circ}\text{C}$):

1 тип – при сушке не наблюдается формирование ни одной температурной площадки.

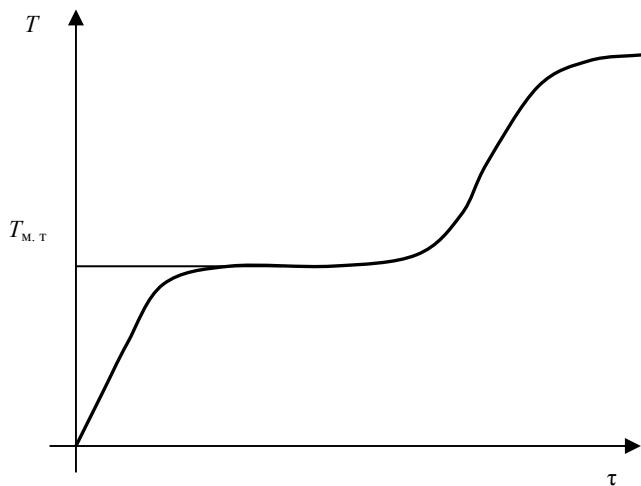
2 тип – при сушке наблюдается только формирование температурной площадки $T_{м.т.}$.

3 тип – при сушке наблюдается формирование только одной площадки, близкой по значению к температуре кипящей воды $T_{кип.}$.

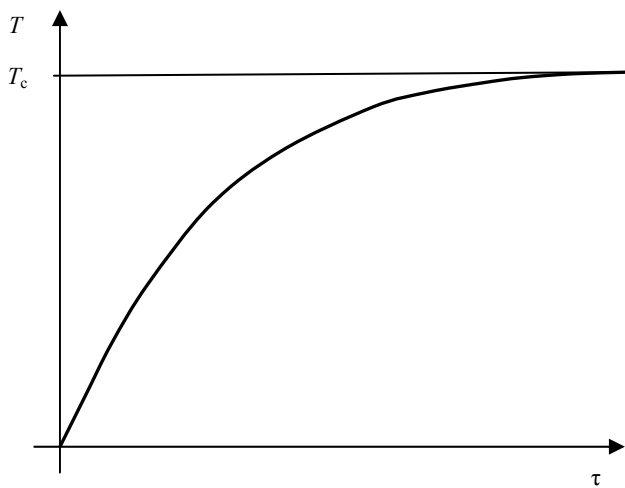
4 тип – при сушке наблюдается формирование двух температурных площадок: близкой по значению к температуре мокрого термометра $T_{м.т.}$ и близкой по значению к температуре кипящей воды $T_{кип.}$.

Под руководством проф. В. И. Коновалова в результате сопоставительного физического анализа литературных и собственных первичных экспериментальных данных предложено выделение шести типов кинетических кривых сушки, классифицируемых по наличию, виду и числу температурных площадок на термограммах сушки, что связано со структурированием высушиваемого продукта при различных режимах сушки и с соответствующим изменением механизмов переноса [181 – 183].

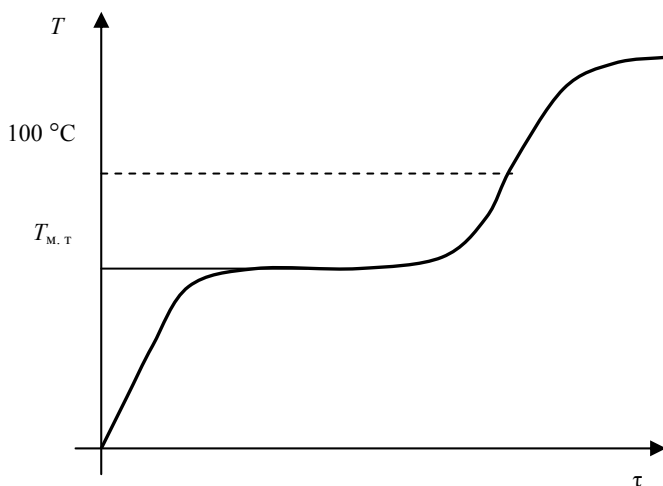
1 тип – температура сушильного агента менее $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, формируется площадка мокрого термометра.



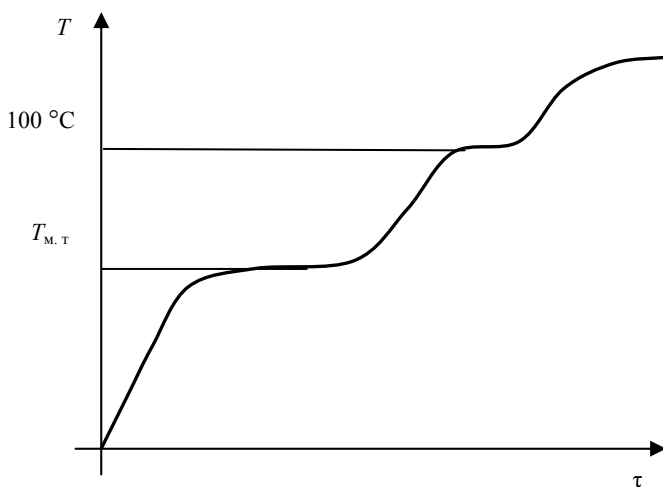
2 тип – температура сушильного агента менее $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, не формируется площадка мокрого термометра.



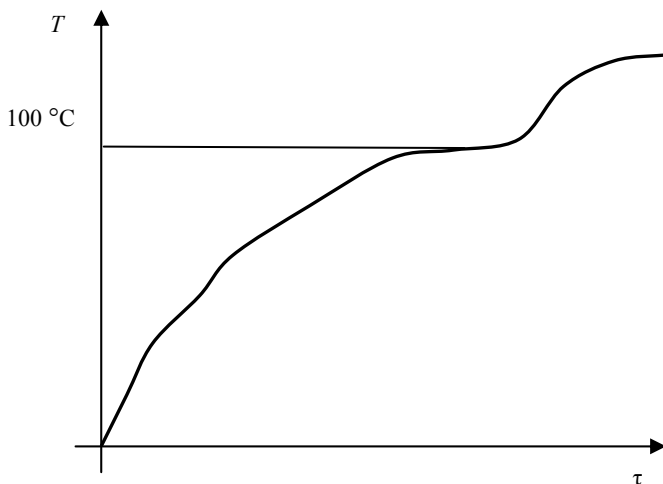
3 тип – температура сушильного агента более $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, формируется площадка мокрого термометра, не формируется площадка кипения (около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$).



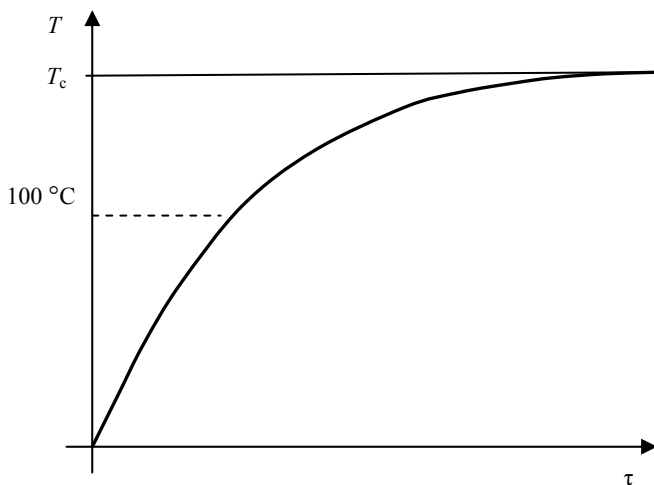
4 тип – температура сушильного агента более $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, формируется площадка мокрого термометра, формируется площадка кипения (около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$).



5 тип – температура сушильного агента более $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, не формируется площадка мокрого термометра, формируется площадка кипения (около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$).



6 тип – температура сушильного агента более $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, не формируется площадка мокрого термометра, не формируется площадка кипения (около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$).



В работах [181 – 183] также показано, что один и тот же продукт, высушиваемый при разной начальной концентрации и/или режимах сушки (мягкий, жесткий), формирует различные кинетические типы кривых. Это обусловлено тем, что в процессе сушки по-разному формируются или, наоборот, вырождаются температурные площадки. Для примера, в табл. 3.2 приведены некоторые типы получаемых при сушке барды кинетических кривых в зависимости от режима сушки и начальной влажности продукта.

3.2. Типы кинетических кривых, получаемых при сушке барды различной начальной влажности [182, 183]

$w, \text{ м/с}$	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	Начальная влажность продукта, %	Тип кривой
3	70	92	1
3	150	92	4
3	200	92	5
5	70	92	1
5	150	92	4
5	200	92	5
5	140	98	3
5	200	98	3
5	70	68	1
5	140	68	5
5	200	68	5
7	70	92	1
7	140	92	4
7	200	92	5
3	70	68	1
3	140	68	5
3	200	68	5
7	70	68	1
7	140	68	5
7	200	68	5
3	70	68	2
3	140	68	5
3	200	68	5

Продолжение табл. 3.2

w , м/с	T , °С	Начальная влажность продукта, %	Тип кривой
5	70	68	2
5	140	68	5
5	200	68	5
7	70	68	2
7	140	68	5
7	200	68	5
3	70	33	2
3	140	33	5
3	200	33	5
5	70	33	2
5	140	33	5
5	200	33	5
7	70	33	2
7	140	33	5
7	200	33	5
7	70	20	2
7	140	20	6
7	200	20	6
5	70	20	2
5	150	20	6
5	200	20	6
3	70	20	2
3	140	20	6
3	200	20	6
7	140	98	3
7	200	98	3

Некоторые характерные сводные графики термограмм, полученные при сушке барды на фторопластовом диске, представлены на рис. 3.3 и 3.4.

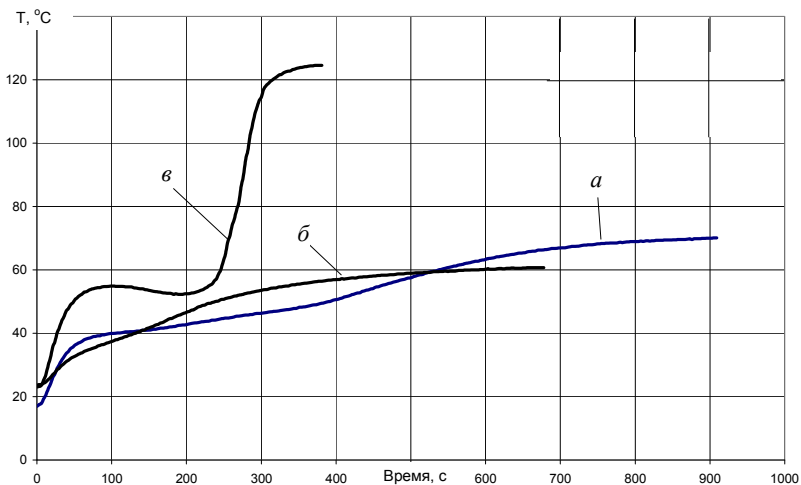


Рис. 3.3. Типы кинетических кривых, получаемых при сушке барды различной начальной концентрации и режимов:

- а* – режим 70 °С, 5 м/с, начальная влажность – 92%, тип 1;
- б* – режим 60 °С, 7 м/с, начальная влажность – 68%, тип 2;
- в* – режим 130 °С, 3 м/с, начальная влажность – 98%, тип 3

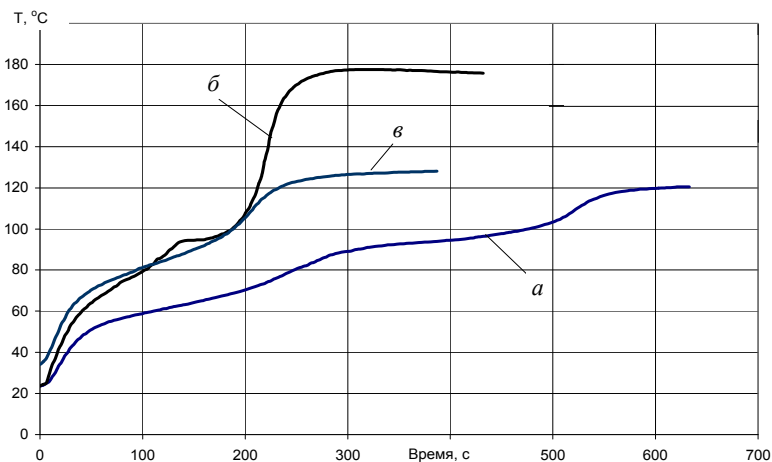


Рис. 3.4. Типы кинетических кривых, получаемых при сушке барды различной начальной концентрации и режимов:

- а* – режим 120 °С, 3 м/с, начальная влажность – 92%, тип 4;
- б* – режим 180 °С, 3 м/с, начальная влажность – 92%, тип 5;
- в* – режим 130 °С, 3 м/с, начальная влажность – 20%, тип 6

3.2. ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТИПА КИНЕТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ

На рисунке 3.5 для примера возможности качественного анализа и прогноза типа кинетической кривой представлены полученные экспериментальные кинетические кривые при сушке исходной послеспиртовой барды и сиропа барды на заданном режиме ($T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $w = 3\text{ м/с}$).

Исходя из анализа свойств высушиваемых продуктов мы знаем, что влажность исходной послеспиртовой барды – около 92%, сиропа, выходящего с выпарной установки – около 65%.

Для исходной послеспиртовой барды влажностью 92% при режиме сушки $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $w = 3\text{ м/с}$ будет происходить удаление в основном свободной жидкости. Температура сушильного агента не слишком велика, поэтому можно предположить наличие на термограмме площадки мокрого термометра. Концентрация твердой фазы не велика, однако как следует из наших исследований, на поверхности высыхающей барды активно формируется пленка, а затем и корка, следовательно, можно также предположить, что будет формироваться и площадка вблизи температуры кипения воды, т.е. около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом прогнозируемый тип кинетической кривой – 4 тип.

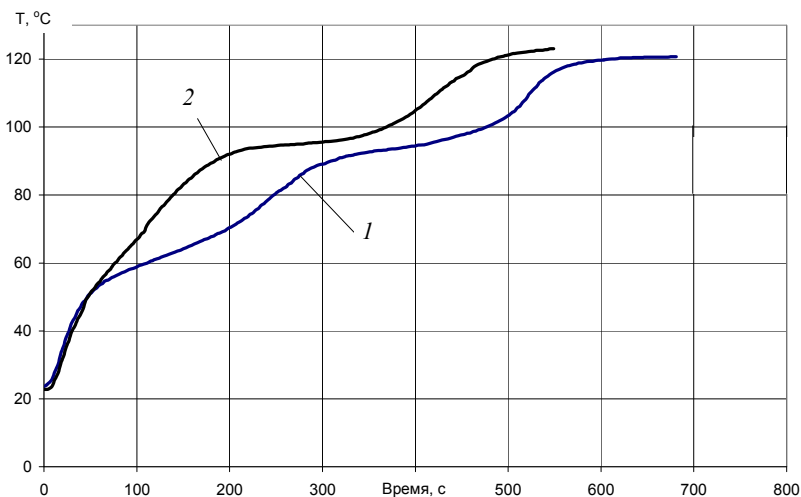


Рис. 3.5. Экспериментальные кинетические кривые при сушке исходной барды (92% начальной влажности) и сиропа (65% начальной влажности) на заданном для прогнозирования режиме:

режим сушки – $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $w = 3\text{ м/с}$; 1 – барда; 2 – сироп

У сиропа, выходящего с выпарной установки, влажность 65%. Следовательно, свободной влаги гораздо меньше, чем в исходной барде. Заданный режим сушки не очень жесткий, следовательно, можно предположить вырождение площадки мокрого термометра. Так как твердой фазы в сиропе больше, чем в исходной барде, сформировавшаяся по окончании первого периода сушки корка будет иметь значительную толщину. Соответственно, можно предположить формирование второй площадки у температуры кипения воды 100 °С. Таким образом, прогнозируемый тип кинетической кривой – 5 тип.

Однако наиболее ценно получить математическую модель прогнозирования типа кинетической кривой, опирающейся на заданные теплофизические и дисперсные свойства продукта и условия сушки.

При сушке жидких дисперсных продуктов на термограммах в районе площадок $T_{м.т}$ и $T_{кип}$ наблюдаются некоторые характерные особенности поведения кинетической кривой. Эти особенности надо классифицировать для возможности их учета в прогностической модели типа кинетической кривой.

4. МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТИПА КИНЕТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ

Как отмечалось выше, возможность прогнозирования типа кинетической кривой сушки является весьма актуальной задачей. Рассмотрим построение прогностической модели типа кинетической кривой для сушки жидких дисперсных продуктов на подложках для мягких и жестких режимов сушки.

4.1. ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ, НАБЛЮДАЕМЫХ ПРИ СУШКЕ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ, СКЛОННЫХ К СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЮ

Рассмотрим основные особенности кинетических кривых, наблюдаемых при сушке жидких дисперсных продуктов на подложках.

При сушке жидкой послеспиртовой барды наблюдаются точка перегиба в районе площадки $T_{м.т}$, монотонный рост температуры в районе площадки $T_{м.т}$, понижение температуры в конце площадки $T_{м.т}$ (рис. 4.1 – 4.3).

При сушке модельных дисперсий – желатин, раствор хлорида натрия наблюдаются резкие скачки и падения температуры в районе площадки $T_{кип}$ (рис. 4.4).

При сушке жидкого пластификатора наблюдаются точка перегиба в районе площадки $T_{кип}$, монотонный рост температуры в районе площадки $T_{кип}$, монотонный рост температуры в районе площадки $T_{м.т}$ (рис. 4.5).

Таким образом, **особенности** кинетических кривых можно классифицировать по следующим **подтипам**:

- 0** – нет особенностей;
- 1** – монотонный рост $T_{м.т}$;
- 2** – точка перегиба в районе $T_{м.т}$;
- 3** – падение температуры в конце $T_{м.т}$;
- 4** – монотонный рост в районе $T_{кип}$;
- 5** – точка перегиба в районе $T_{кип}$;
- 6** – колебания (пики/провалы) термограммы в районе $T_{кип}$.

Соответственно, для классификации по типам кинетических кривых необходимо указывать тип кривой и подтип особенности. Например: тип 1-1 означает, что при сушке формируется площадка мокрого термометра и при этом наблюдается монотонный рост площадки $T_{м.т}$. В случае если при росте площадки $T_{м.т}$ наблюдается еще и точка перегиба, необходимо указать дополнительную особенность. Например, в этом случает $T_{кип}$ 1-1,2.

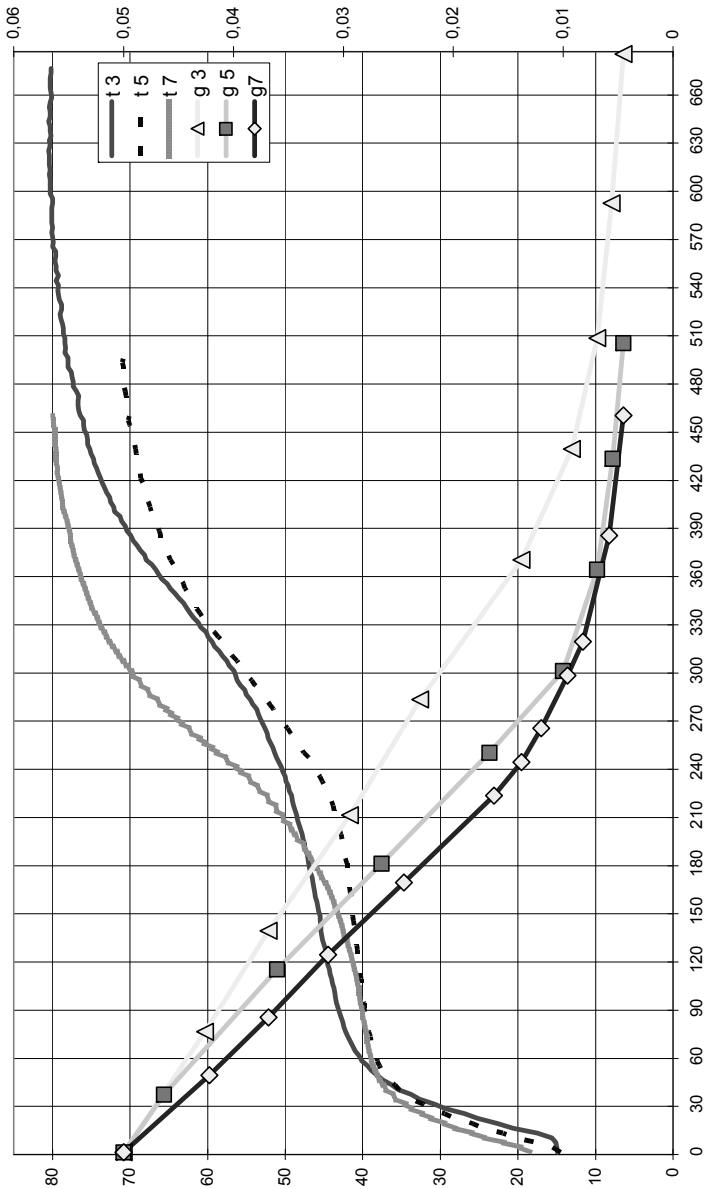


Рис. 4.1. Перегиб в районе площадки $T_{m, T}$

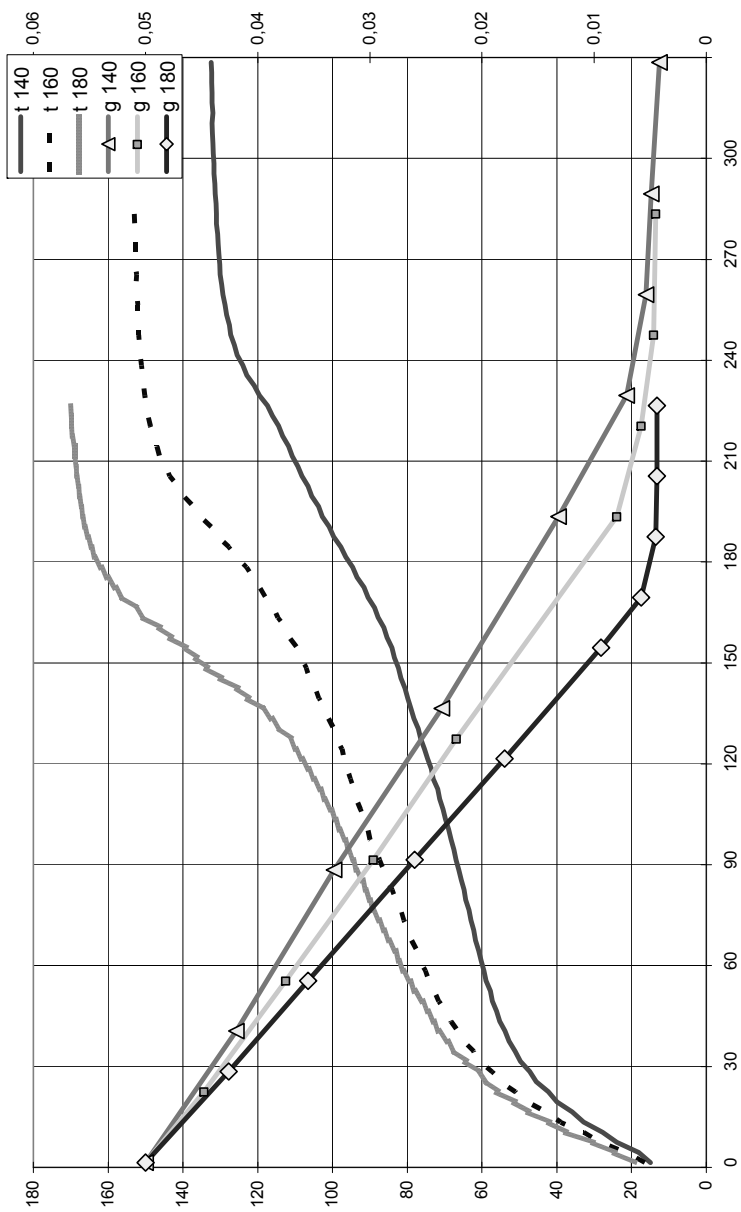


Рис. 4.2. Монотонный рост термограммы в районе площадки $T_{m,t}$

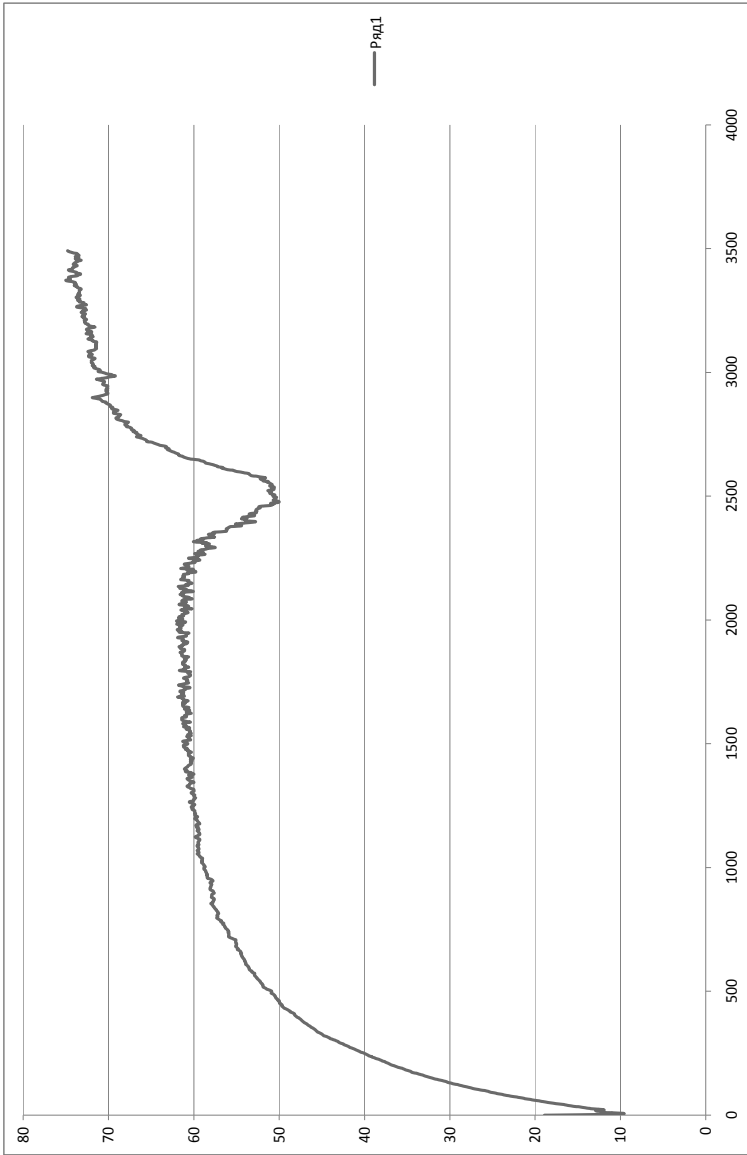


Рис. 4.3. Понижение температуры в конце площадки $T_{м.г}$

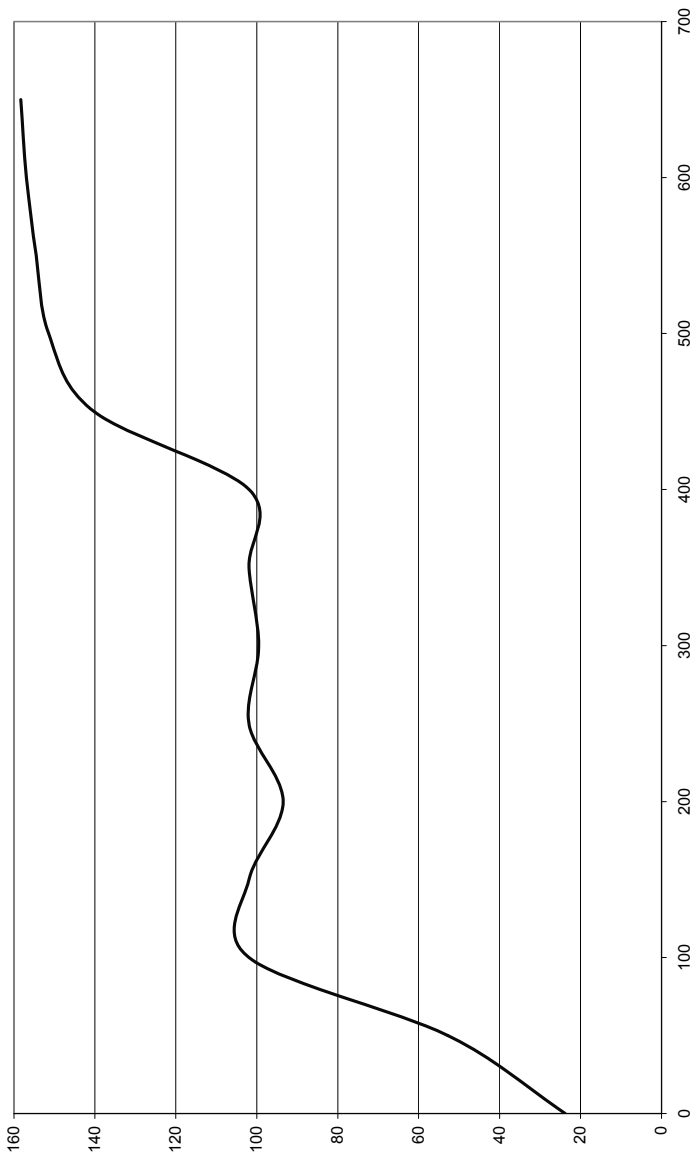
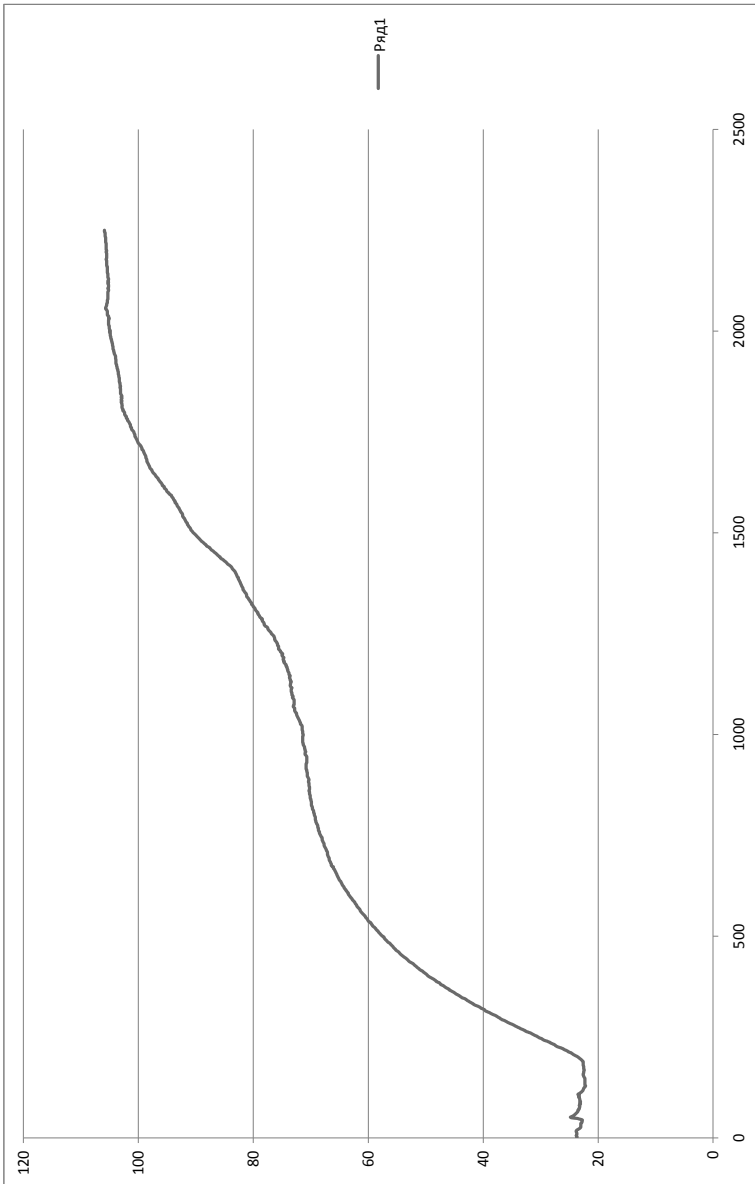


Рис. 4.4. Колебания температуры в районе площадки $T_{\text{впл}}$. Хлорид натрия 15%. $T = 160$ °С, $w = 5$ м/с. Подложка – алюминий, $\delta = 2$ мм



a)

б)

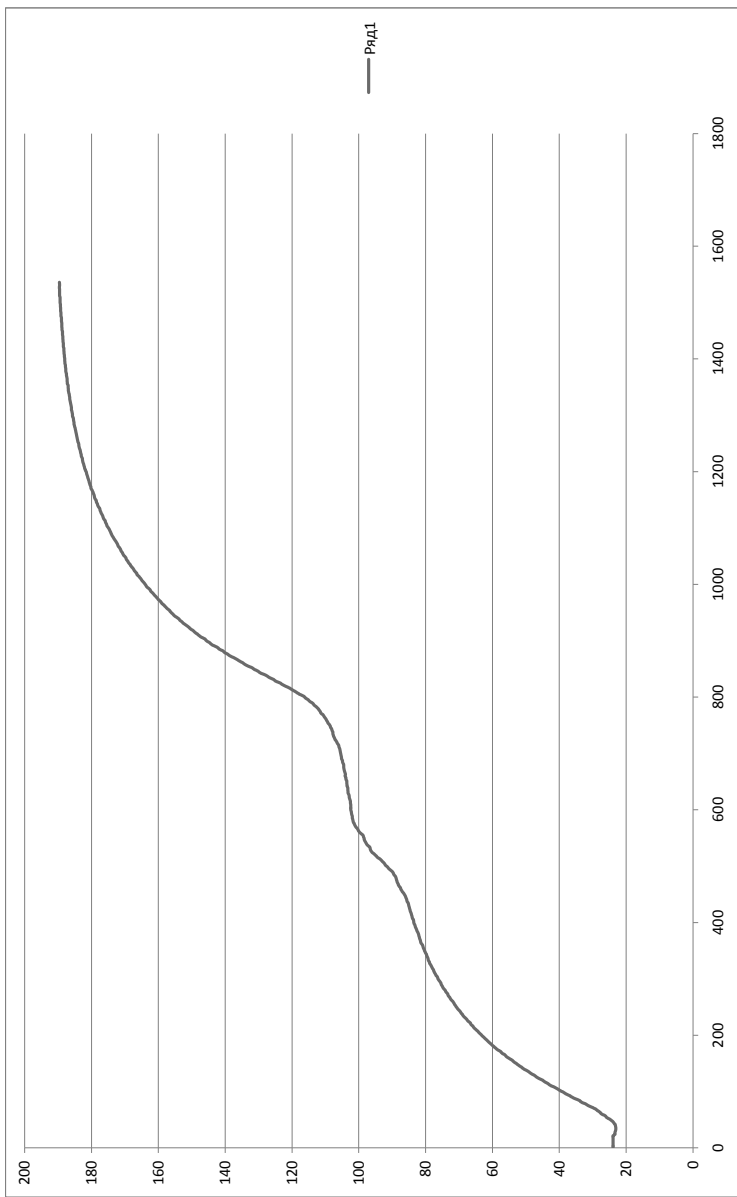


Рис. 4.5. Точка перегиба и монотонный рост температуры в районе площадки $T_{м.г}$ (а) и в районе площадки $T_{кпп}$ (б)

В случае использования прогностической модели возможно получение типа, обозначаемого, например, так: $T_{\text{кип}}$ 4-4 (5, 6?). Это означает, что при жестких режимах сушки формируется ровная площадка $T_{\text{м.т}}$, в районе площадки $T_{\text{кип}}$ наблюдается некоторый рост температуры, возможно формирование точки перегиба и колебаний температуры в районе $T_{\text{кип}}$.

Получение подобного вывода в прогностической модели позволит выбрать вид температурно-влажностной зависимости для использования ее в инженерной методике расчета кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках.

4.2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для построения прогностической модели необходимо определиться с входными и выходными параметрами модели. В качестве выходного параметра модели выбираем тип кривой в соответствии с предложенной классификацией типов кинетических кривых.

Определим входные параметры модели. Для выбора факторов, влияющих на характер кинетической кривой, необходимо проанализировать экспериментальные данные, выбрать первоначальный набор факторов, оценить их вклад в нескольких числовых диапазонах. Из первоначального набора необходимо выбрать наиболее характерные влияющие (лимитирующие) факторы.

В результате проведенного сопоставительного анализа кинетических кривых сушки, полученных для различных жидких дисперсных материалов (проанализированы свойства и кинетические кривые сушки более 20 жидкостей), в различных режимах сушки, были выбраны следующие лимитирующие факторы, влияющие на тип получаемой кривой:

- 1) исходная концентрация твердой фазы;
- 2) дисперсный состав;
- 3) характерная форма частиц;
- 4) характер жидкой фазы;
- 5) тепловые свойства подложки.

Как уже было отмечено, характер кинетических кривых удобно отдельно рассматривать для так называемых «мягких» (T до 100 °C) и «жестких» (T более 100 °C) режимов сушки.

4.2.1. Критерий оценки возможности структурообразования

Для прогностической оценки типа кинетической кривой введем критерий оценки возможности структурообразования (КОВС), численно определяющий характер структурообразования в процессе сушки, в зависимости от степени влияния указанных выше лимитирующих факторов. На основании анализа различных вариантов выражений (оценивалось четыре варианта) для критерия оценки возможности структурообразования был выбран критерий вида

$$\text{КОВС} = \sum_{i=1}^n \text{Вк}_i \Phi_i, \quad (4.1)$$

где Вк_i – значение весового коэффициента соответствующего фактора; Φ_i – значение определенного фактора; n – количество учитываемых в критерии влияющих факторов.

Оценки значений Φ_i и Вк_i зависят от режима сушки и полученных свойств высушиваемого продукта.

Для удобства расчета значений КОВС (явный вид критерия и оценки входящих в него факторов и весовых коэффициентов) необходимо привести оценки для мягких и жестких режимов сушки соответственно. Границей, определяющей режим сушки, является температура сушильного агента (подложки для кондуктивного теплоподвода, эквивалентная температура – для радиационного теплоподвода). Из представленной классификации и по физике процесса сушки границей мягких и жестких режимов выбрано значение 100 °С (мягкие режимы – $T < 100$ °С, жесткие режимы – $T > 100$ °С).

Характер структурообразования можно разделить на следующие уровни:

- 1) структурообразование отсутствует;
- 2) слабое структурообразование;
- 3) умеренное структурообразование;
- 4) сильное структурообразование.





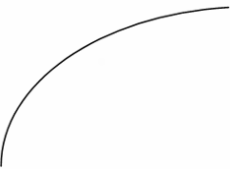
Чем выше значение КОВС, тем выше уровень структурообразования. Диапазоны значений КОВС и оценки типов кинетических кривых приведены далее для мягких и жестких режимов соответственно.

4.2.2. Модель для мягких режимов сушки

Рассмотрим характер эволюции типа кинетической кривой (с учетом особенностей) в зависимости от структурообразования сначала для мягких режимов.

В таблице 4.1 представлен характер эволюции площадки мокрого термометра в зависимости от структурообразования на поверхности. С ростом интенсивности структурообразования площадка $T_{м.т}$ все более вырождается.

4.1. Вид площадки $T_{м.т}$ для мягких режимов

Характер площадки $T_{м.т}$	
1. Ровная	
2. С точкой перегиба	
3. Растет	
4. Растет, с точкой перегиба	
5. Отсутствует	

Уровень структурообразования растет →

Для построения модели дадим оценки факторов, влияющих на тип кинетической кривой, и соответствующих им весовых коэффициентов.

Фактор 1 – Исходная концентрация твердой фазы (Ф1)

Исходя из сравнительного анализа влияния исходной концентрации на тип кривой, были выбраны следующие опорные значения величины фактора Ф1 (в баллах) в зависимости от концентрации (табл. 4.2).

4.2. Значения фактора Ф1

Концентрация, масс.	10% и менее	20%	30%	40%	50% и более
Балл	1	2	3	4	5

Фактор 2 – Дисперсный состав (Ф2)

Выбор единственного значения лимитирующего размера частиц весьма сложная задача, учитывая сложный фракционный состав исследуемых жидких дисперсных продуктов. В результате сопоставительного анализа для выбора лимитирующего размера принят минимальный средний размер частиц, составляющих не менее 30% всей дисперсной фазы. Расчет производится по данным, получаемым с лазерного анализатора частиц или микроскопа. Пример расчета приведем далее.

Опорные величины фактора Ф2 в зависимости от лимитирующего размера представлены в табл. 4.3.

Фактор 3 – Форма частиц (Ф3)

В оценке формы, так же как и в оценке размера, необходимо выделение лимитирующего значения. Соответственно, для оценки по модели выделяются три вида лимитирующих форм частиц:

Форма 1 – шар, куб, пирамида (минимум контактов).

Форма 2 – диск, октаэдр, пластина/стержень.

Форма 3 – цилиндр, кость, рогалик (максимум контактов).

4.3. Значения фактора Ф2

Лимитирующий размер	0,001 мм и менее	0,01 мм	0,1 мм и более
Балл	2	1	0

Оцениваем процентное соотношение частиц различных форм в твердой фазе и величину их совокупных взаимных контактов по формуле

$$C = \sum_{ij} x_{ij}^{\min} K_{ij}, \quad (4.2)$$

где C – величина совокупных взаимных контактов частиц; x_{ij}^{\min} – минимальная концентрация выделенной пары частиц формы ij в твердой фазе; K_{ij} – значение контактов для выделенной пары частиц ij .

Как показала практика исследования форм частиц, достаточно выделения 3-4 отдельных форм частиц, преобладающих в заданном продукте. Приведем пример оценки величины C – совокупных взаимных контактов частиц для некоторого модельного продукта.

В некотором исследованном продукте выделены четыре характерные формы и соответствующее им процентное содержание в твердой фазе (в скобках указан номер по классификации):

1 – шар (№ 1) – 20%;

2 – пирамида (№ 4) – 40%;

3 – куб (№ 2) – 30%;

4 – кость (№ 8) – 10%.

Составляем таблицу возможных неповторяющихся взаимных парных контактов частиц (по номерам в классификации) и соответствующих им положений:

Пара контактов частиц	Число контактов выбранной пары
1-2 (1-4)	3
1-3 (1-2)	1
1-4 (1-8)	7
2-3 (4-2)	2
2-4 (4-8)	4
3-4 (2-8)	8

В формуле (4.2) величину x_{ij} (концентрация выделенной формы частицы в твердой фазе) определяем для каждой пары по минимальной величине концентрации в паре:

$$C = 0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 1 + 0,1 \cdot 7 + 0,4 \cdot 2 + 0,4 \cdot 4 + 0,3 \cdot 8 = 6,3.$$

Если значение взаимных контактов преобладающей по форме частицы значительно меньше рассчитанного значения C , то увеличи-

ваем фактор формы частицы на 1. То есть в нашем примере преобладающая форма частиц – пирамида – лимитирующая форма 1. Значение взаимного контакта пары – 3. Рассчитанное значение $C = 6,3$. Следовательно, в модели прогноза можно предложить выделение лимитирующей формы 2.

В некоторых случаях можно упрощенно оценить лимитирующую форму по преобладающей форме частиц, наблюдаемых в дисперсной фазе, без учета полученного совокупного значения контактов. Например, для мясо-костной жидкости лимитирующая форма частиц – шар ($\approx 95\%$ всех частиц).

Опорные величины фактора Ф3 в зависимости от полученной лимитирующей формы представлены в табл. 4.4.

4.4. Значения фактора Ф3

Форма	Форма 1	Форма 2	Форма 3
Балл	1	2	3

Фактор 4 – Характер жидкой фазы (Ф4)

Жидкая фаза в жидких дисперсных продуктах – это, как правило, либо вода, либо раствор определенной концентрации. Для оценки влияния характера жидкой фазы были выбраны растворы, близкие к насыщению, и растворы, далекие от насыщения. Оценка принадлежности раствора к близкому и далекому от насыщения (применительно к сушке) была сделана на основании обработки экспериментальных данных и составила:

- раствор, близкий к насыщению, – C раствора находится в диапазоне от $C_{\text{нас}} \cdot 0,65$ до $C_{\text{нас}}$;
- раствор, далекий от насыщения, – C менее $C_{\text{нас}} \cdot 0,65$ ($C_{\text{нас}}$ определяется для заданной температуры сушки).

К воде можно отнести также очень слабые растворы C менее $C_{\text{нас}} \cdot 0,01$.

Опорные величины фактора Ф4 в зависимости от вида жидкой фазы представлены в табл. 4.5.

4.5. Значения фактора Ф4

Вид жидкой фазы	Вода	Раствор, далекий от насыщения	Раствор, близкий к насыщению
Балл	0	1	2

Фактор 5 – Тепловые свойства подложки (Ф5)

Нами использовались подложки из высоко- и низкотеплопроводных материалов в различных условиях теплоподвода, например кондукция и конвекция. Как показал анализ, на характер кинетических кривых сильно влияет величина теплоподвода. Теплоподвод со стороны подложки был оценен как малый, средний и сильный. Оценка величины теплоподвода производилась по формуле

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(T_c - T_n) + \alpha(T_c - T_n), \quad (4.3)$$

где T_c – температура сушильного агента (или подложки для кондуктивного теплоподвода); T_n – начальная температура холодного материала или температура окружающей среды для естественной конвекции; λ – коэффициент теплопроводности подложки, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К) (оценивается по критериальному уравнению для чистого нагрева); δ – толщина подложки, м.

По результатам расчета характер теплоподвода оценен величиной q :

- сильный теплоподвод – $q > 10^7$ Вт/м²;
- средний – от 10^5 до 10^7 Вт/м²;
- малый – до 10^5 Вт/м².

Опорные величины фактора Ф5 в зависимости от теплоподвода представлены в табл. 4.6.

4.6. Значения фактора Ф5

Теплоподвод	Малый	Средний	Сильный
Балл	1	2	3

В результате сопоставительного анализа 405 различных вариантов влияния рассмотренных факторов на тип кинетической кривой были установлены значения весовых коэффициентов (Вк) для каждого фактора, приведенные в табл. 4.7.

4.7. Значения весовых коэффициентов (Вк) для каждого фактора (мягкие режимы)

Фактор	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5
Весовой коэффициент	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5

Для мягких режимов сушки значение диапазона КОВС составляет от 3 до 15.

Значение КОВС = 3 соответствует отсутствию структурообразования, значение КОВС = 15 соответствует сильному структурообразованию. Соответственно, крайние значения критерия (характер структурообразования) определяют крайние типы кинетических кривых.

То есть значение критерия КОВС = 3 соответствует 1-му виду площадки $T_{м.т}$ (табл. 4.1), значение КОВС = 15 соответствует 5-му виду площадки $T_{м.т}$.

На рисунке 4.6 представлена гистограмма сопоставления полученных значений КОВС с видом площадки $T_{м.т}$ (ВП).

В таблице 4.8 приведено соответствие полученного вида площадки $T_{м.т}$ типу и особенности кинетической кривой сушки по классификации (см. гл. 3).

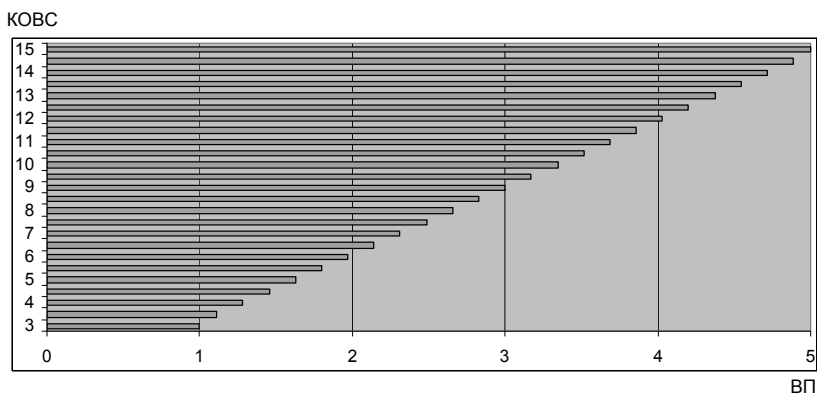


Рис. 4.6. Соответствие значений КОВС с видом площадки $T_{м.т}$

4.8. Соответствие полученного вида площадки $T_{м.т}$ с типом и особенностью кинетической кривой сушки по классификации

Вид площадки $T_{м.т}$, полученный по расчету	Тип кинетической кривой по классификации
1	1-0
2	1-2
3	1-1
4	1-1,2
5	2-0

В итоге **уравнения прогностической модели** типа кинетической кривой для **мягких режимов** (даны аппроксимации для расчета величины факторов Φ_1, Φ_2 ; для факторов $\Phi_3 - \Phi_5$ оценки даны выше) будут иметь вид:

$$\Phi_1 = 0,1C, \quad (4.4)$$

где C – массовая концентрация твердой фазы в исходном жидком продукте;

$$\Phi_2 = -0,4592 \ln(x) - 1,062, \quad (4.5)$$

где x – лимитирующий размер;

$$\Phi_3 = \begin{cases} 1, \text{ форма 1,} \\ 2, \text{ форма 2,} \\ 3, \text{ форма 3;} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\Phi_4 = \begin{cases} 0, \text{ вода,} \\ 0, c = 0,001C_{\text{нас}}, \\ 1, c \leq C_{\text{нас}} \cdot 0,65, \\ 2, c \geq C_{\text{нас}} \cdot 0,65; \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\Phi_5 = \begin{cases} 1, \text{ малый,} \\ 2, \text{ средний,} \\ 3, \text{ сильный;} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\text{КОВС} = \sum_{i=1}^5 \Phi_i V_{\text{к}i}; \quad (4.9)$$

$$\text{ВП} = 0,3432 \text{КОВС} - 0,0888. \quad (4.10)$$

Алгоритм определения типа кинетической кривой для мягких режимов:

1. Для исследуемого продукта определяем концентрацию твердой фазы. Соответственно полученному значению определяем величину Φ_1 по уравнению (4.4).

2. На лазерном анализаторе частиц или с помощью микроскопа оцениваем фракционный состав исследуемого продукта. Получаем гистограмму распределения размеров в процентах.

3. Лимитирующий размер x рассчитываем как минимальный средний размер частиц, составляющих не менее 30% всей дисперсной фазы. По формуле (4.5) определяем величину Φ_2 .

4. Оцениваем характерные формы частиц твердой фазы с использованием микроскопа. Выбираем лимитирующую форму по преобладающей форме частиц и соответственно по формуле (4.6) оцениваем фактор формы Ф3.

5. Определяем характер жидкой фазы. В общем случае характер жидкой фазы должен быть известен из технологии получения дисперсного продукта. Например, для жидкого пластификатора это раствор, для барды и мясо-костной жидкости – вода. В частном случае необходим анализ. Соответственно оцениваем значение фактора Ф4 по формуле (4.7).

6. По формуле (4.3) оцениваем величину теплоподвода. Получаем значение фактора Ф5 по формуле (4.8).

Оценка условий в формулах (4.6) – (4.8) приведена выше в описании факторов.

7. По формуле (4.9) рассчитываем значение критерия оценки возможного структурообразования и по полученному значению КОВС, по формуле (4.10) определяем значение вида площадки $T_{м.т.}$. В случае если значение типа кривой лежит между целыми числами, необходим выбор вида кривой по округленному значению.

Например:

Рассчитанное значение ВП лежит в диапазоне (1,0...1,4]. Следовательно, выбираем вид 1.

Рассчитанное значение ВП лежит в диапазоне [2,75...3,0). Следовательно, выбираем вид 3.

Рассчитанное значение ВП лежит в диапазоне (3,40...3,75). В данном случае возможно формирование как вида 3, так и вида 4. Скорее всего, это будет промежуточный между 3 и 4 вид. В этом случае при расчете нужно оценить кинетику сушки по виду 3 и 4.

8. По таблице 4.8 устанавливаем соответствие вида площадки $T_{м.т.}$ с типом и особенностью формирующейся кинетической кривой.

4.2.3. Модель для жестких режимов сушки

В прогностической модели для жестких режимов входными данными будут:

- 1) исходная концентрация твердой фазы;
- 2) дисперсный состав;
- 3) характерная форма частиц;
- 4) характер жидкой фазы;
- 5) тепловые свойства подложки;
- 6) температура сушильного агента или подложки (для кондуктивного теплоподвода).

При жестких режимах сушки возможны следующие комбинации температурных площадок:

1. Есть некоторый вид площадки $T_{м.т}$ и некоторая площадка $T_{кип}$.
2. Есть некоторый вид площадки $T_{м.т}$ и отсутствует площадка $T_{кип}$.

3. Отсутствует площадка $T_{м.т}$ и есть некоторая площадка $T_{кип}$.

4. Отсутствуют площадки $T_{м.т}$ и $T_{кип}$.

Соответственно, для определения характера площадки в первом периоде сначала оцениваем вид площадки по прогностической модели мягких режимов с величиной фактора $\Phi 5 = 3$. Таким образом, мы получаем оценку вида площадки в районе $T_{м.т}$. Затем необходим анализ дополнительных баллов в модели жестких режимов для оценки вида кинетической кривой в районе площадки $T_{кип}$.

Исходя из анализа полученных термограмм, можно выделить три вида кинетических кривых в районе площадки $T_{кип}$ (табл. 4.9).

4.9. Вид термограммы в районе площадки $T_{кип}$

Вид кривой	Характер площадки
1 – площадка в районе $T_{кип}$ ровная, практически не имеет подъема, всплесков и падений температуры	
2 – площадка в районе $T_{кип}$ имеет подъем, могут наблюдаться всплески и падения температуры	
3 – площадка в районе $T_{кип}$ практически не выражена	

Выберем факторы, влияющие на характер кривой в прогностической модели для жестких режимов:

Фактор формы частиц (Ф1ж)

Оценка фактора формы частиц аналогична оценке фактору формы для мягких режимов. Оценку формы также проводим в соответствии с классификацией форм частиц. Оцениваем процентное соотношение частиц различных форм в твердой фазе. Выбираем лимитирующую форму по преобладающей форме частиц, наблюдаемых в дисперсной фазе. При этом разделяем частицы на три вида формы:

- форма 1 – шар, цилиндр, диск (минимум контактов);
- форма 2 – пирамида, куб, стержень;
- форма 3 – октаэдр, кость, рогалик (максимум контактов).

Опорные величины фактора Ф1ж в зависимости от лимитирующей формы представлены в табл. 4.10.

4.10. Значения фактора Ф1ж

Форма	Форма 1	Форма 2	Форма 3
Балл	1	2	3

Фактор размера частиц (Ф2ж)

Фактор размера частиц оценивается аналогично фактору для мягких режимов. Опорные величины фактора Ф2ж в зависимости от лимитирующего размера представлены в табл. 4.11.

4.11. Значения фактора Ф2ж

Лимитирующий размер	0,001 мм и менее	0,01 мм	0,1 мм и более
Балл	2	1	0

Фактор характера жидкой фазы (Ф3ж)

Фактор характера жидкой фазы оценивается аналогично фактору Ф4 для мягких режимов (см. выше). Опорные величины фактора Ф3ж в зависимости от вида жидкой фазы представлены в табл. 4.12.

4.12. Значения фактора Ф3ж

Жидкая фаза	Вода	Раствор, далекий от насыщения	Раствор, близкий к насыщению
Балл	0	1	2

Фактор температуры (Ф4ж)

Как показал анализ параметров, влияющих на характер кинетической кривой сушки в районе площадки кипения, одним из лимитирующих факторов является значение температуры. Это связано прежде всего с возможной деструкцией высушиваемого продукта при определенных температурах, а также термостабильностью высушиваемого продукта.

Опорные величины фактора Ф4ж в зависимости от температуры сушильного агента (для конвективного теплоподвода) или температуры подложки (для кондуктивного теплоподвода) представлены в табл. 4.13.

4.13. Значения фактора Ф4ж

Температура, °С	До 120	От 120 до 150	От 150 до 160 и выше
Балл	1	2	3

В результате сопоставительного анализа 81 различного варианта влияния рассмотренных факторов на тип кинетической кривой были установлены значения весовых коэффициентов (Вк) для каждого фактора, представленные в табл. 4.14.

4.14. Значения весовых коэффициентов (Вк) для каждого фактора (жесткие режимы)

Фактор	Ф1ж	Ф2ж	Ф3ж	Ф4ж
Весовой коэффициент	0,5	1,0	1,0	1,5

Вид кинетической кривой в районе площадки $T_{\text{кип}}$ будет определяться значением критерия оценки возможного структурообразования для жестких режимов. Значение диапазона КОВС для жестких режимов составляет от 4 до 12.

Соответственно, крайние значения КОВС определяют крайние виды кинетических кривых. То есть значение суммы баллов 4 соответствует 3-му характеру площадки $T_{\text{кип}}$ (см. табл. 4.9), значение суммы баллов 12 соответствует 1-му характеру площадки $T_{\text{кип}}$. На рисунке 4.7 приведено соответствие рассчитанного значения КОВС для жестких режимов с видом площадки $T_{\text{кип}}$ (по оси x – вид площадки, по оси y – значения КОВС).

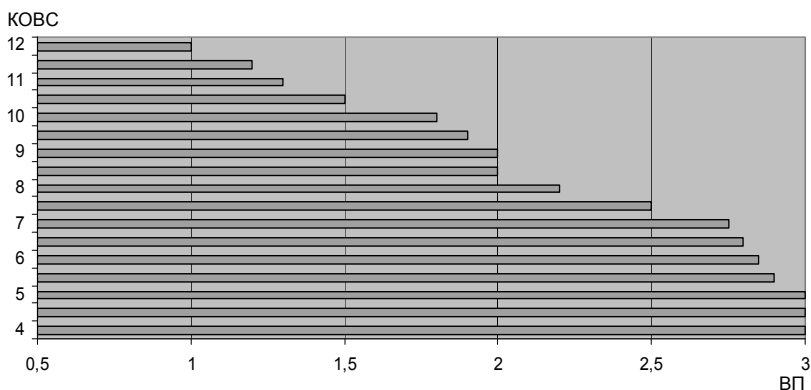


Рис. 4.7. Соответствие значений КОВС с видом площадки $T_{кип}$

4.15. Соответствие полученного вида площадки $T_{м.т}$ и полученного вида площадки $T_{кип}$ с типом и особенностью кинетической кривой сушки по классификации

Вид площадки $T_{м.т}$ полученный по расчету	Вид площадки $T_{кип}$ полученный по расчету	Тип кинетической кривой по классификации
1	1	4-0
2	1	4-2
3	1	4-1
4	1	4-1,2
5	1	5-0
1	2	4-4(5,6?)
2	2	4-2,4(5,6?)
3	2	4-1,4(5,6?)
4	2	4-1,2,4(5,6?)
5	2	5-4(5,6?)
1	3	3-0
2	3	3-2
3	3	3-1
4	3	3-1,2
5	3	6-0

В таблице 4.15 приведено соответствие полученного вида площадки $T_{м.т}$ и полученного вида площадки $T_{кип}$ с типом и особенностью кинетической кривой сушки по классификации (см. гл. 3). Примечание

к таблице: запись типа кривой 5-4 (5,6?) означает 5 тип 4 особенность (жесткие режимы, нет площадки $T_{м.т.}$, в районе площадки $T_{кип}$ наблюдается рост температуры) и вероятны особенности 5 и 6 (перегиб и колебания температуры на термограмме в районе $T_{кип}$).

В итоге **уравнения прогностической модели** определения факторов, влияющих на вид кинетической кривой для **жестких режимов** (аналогично уравнениям для мягких режимов), имеют вид:

$$\Phi_{1ж} = \begin{cases} 1, \text{ форма 1,} \\ 2, \text{ форма 2,} \\ 3, \text{ форма 3;} \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\Phi_{2ж} = -0,4592 \ln(x) - 1,062, \quad (4.12)$$

где x – лимитирующий размер;

$$\Phi_{3ж} = \begin{cases} 0, \text{ вода,} \\ 0, c = 0,001C_{нас}, \\ 1, c \leq C_{нас} \cdot 0,65, \\ 2, c \geq C_{нас} \cdot 0,65; \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\Phi_4 = 0,05T - 5, \quad (4.14)$$

где T – температура сушильного агента;

$$\text{КОВС} = \sum_{i=1}^3 \Phi_i \text{Вк}_i ; \quad (4.15)$$

$$\text{ВП} = 0,004 \text{КОВС}^3 - 0,1166 \text{КОВС}^2 + 0,7782 \text{КОВС} + 1,5036. \quad (4.16)$$

Алгоритм определения типа кинетической кривой:

1. По уравнениям (4.4) – (4.10) и алгоритму для мягких режимов, при величине фактора $\Phi_5 = 3$ (теплоподвод) получаем вид кинетической кривой в районе площадки $T_{м.т.}$.

2. Аналогично модели для мягких режимов по формулам (4.11) – (4.14) оцениваем величину факторов $\Phi_{1ж}$ – $\Phi_{4ж}$.

3. По формуле (4.15) рассчитываем значение критерия оценки возможного структурообразования и по полученному значению баллов, по формуле (4.16) вычисляем значение вида площадки $T_{кип}$. В случае если значение типа кривой лежит между целыми числами, необходим выбор вида кривой по округленному значению, аналогично выбору вида площадки $T_{м.т.}$.

4. Используя данные табл. 4.15, определяем тип кинетической кривой сушки по классификации.

4.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА ТИПА КИНЕТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрим несколько примеров применения предложенной прогностической модели к определению типа кинетической кривой сушки.

Прогноз 1.

Сушка мясо-костной жидкости на фторопластовой подложке при температуре 80 °С в конвективной сушилке.

Оцениваем факторы для модели мягких режимов:

Ф1 = 1 (по концентрации твердой фазы, см. гл. 2);

Ф2 = 0 (по лимитирующему размеру частиц, см. гл. 2);

Ф3 = 1 (по характерной форме частиц, см. гл. 2);

Ф4 = 0 (по характеру жидкой фазы, см. гл. 2).

Толщина подложки – 2 мм.

Рассчитываем по формуле (1)

$$q = 7500 \text{ Вт/м}^2.$$

Ф5 = 1 (теплоподвод – малый).

По модели получаем КОВС = 3, ВП = 1.

По таблице 4.9 получаем тип кинетической кривой – тип 1-0.

Экспериментально получен тип 1-0 (см. гл. 3).

Прогноз 2.

Сушка мясо-костной жидкости на алюминиевой подложке при температуре 160 °С в конвективной сушилке.

Оцениваем факторы для модели мягких режимов:

Ф1 = 1 (по концентрации твердой фазы, см. гл. 2);

Ф2 = 0 (по лимитирующему размеру частиц, см. гл. 2);

Ф3 = 1 (по характерной форме частиц, см. гл. 2);

Ф4 = 0 (по характеру жидкой фазы, см. гл. 2);

Ф5 = 3 (теплоподвод – большой).

По модели получаем КОВС = 6, вид площадки $T_{м.т} = 2$.

Оцениваем факторы для модели жестких режимов:

Ф1ж = 1 (по характерной форме частиц, см. гл. 2);

Ф2ж = 1 (по лимитирующему размеру частиц, см. гл. 2);

Ф3ж = 1 (по характеру жидкой фазы, см. гл. 2);

Ф4ж = 3 (160 °С).

По модели получаем КОВС = 7, вид площадки $T_{кип} = 2,75$ (для прогноза нужно взять тип 3, но предварительно для оценки возьмем тип 2 и 3).

По таблице 4.15 получаем:

– для вида $T_{м.т} = 2$ и $T_{кип} = 2$, тип кинетической кривой – тип 3-4;

– для вида $T_{м.т} = 2$ и $T_{кип} = 3$, тип кинетической кривой – тип 3-2.

Экспериментально получен тип 3-2, т.е. выбор вида площадки $T_{кип}$ обоснован.

Прогноз 3.

Сушка послеспиртовой барды на фторопластовой подложке при температуре 80 °С в конвективной сушилке.

Оцениваем факторы для модели мягких режимов:

Ф1 = 1 (по концентрации твердой фазы, см. гл. 2);

Ф2 = 2 (по лимитирующему размеру частиц, см. гл. 2);

Ф3 = 3 (по характерной форме частиц, см. гл. 2);

Ф4 = 1 (по характеру жидкой фазы, см. гл. 2);

Ф5 = 1 (теплоподвод – малый).

По модели получаем КОВС = 6,5, вид площадки – 2.

По таблице 4.9 получаем тип кинетической кривой – тип 1-2.

Экспериментально получен тип 1-2 (см. гл. 3).

Прогноз 4.

Сушка послеспиртовой барды на алюминиевой подложке при температуре 160 °С в конвективной сушилке.

Оцениваем факторы для модели мягких режимов:

Ф1 = 1 (по концентрации твердой фазы, см. гл. 2);

Ф2 = 2 (по лимитирующему размеру частиц, см. гл. 2);

Ф3 = 3 (по характерной форме частиц, см. гл. 2);

Ф4 = 1 (по характеру жидкой фазы, см. гл. 2);

Ф5 = 3 (теплоподвод – большой).

По модели получаем КОВС = 9,5, вид площадки $T_{м.т} = 3$.

Оцениваем факторы для модели жестких режимов:

Ф1ж = 3 (по характерной форме частиц, см. гл. 2);

Ф2ж = 2 (по лимитирующему размеру частиц, см. гл. 2);

Ф3ж = 2 (по характеру жидкой фазы, см. гл. 2);

Ф4ж = 3 (160 °С).

по модели получаем КОВС = 11, вид площадки $T_{кип} = 3$.

По таблице 4.15 получаем для вида $T_{м.т} = 3$ и $T_{кип} = 3$ тип кинетической кривой – тип 3-1.

Экспериментально получен тип 3-1.

Прогноз 5.

Сушка жидкого пластификатора на фторопластовой подложке при температуре 80 °С в конвективной сушилке.

Оцениваем факторы для модели мягких режимов:

Ф1 = 1 (по концентрации твердой фазы, см. гл. 2);

Ф2 = 2 (по лимитирующему размеру частиц, см. гл. 2);

Ф3 = 3 (по характерной форме частиц, см. гл. 2);

Ф4 = 2 (по характеру жидкой фазы, см. гл. 2);

Ф5 = 1 (теплоподвод – малый).

По модели получаем КОВС = 8, вид площадки $T_{м.т} = 2,7$.

Рассмотрим для типа 2 и для типа 3.

По таблице 4.9 для вида площадки $T_{м.т} - 2$ получаем тип кинетической кривой – тип 1-2, для вида площадки $T_{м.т} - 3$ получаем тип кинетической кривой – тип 1-1.

Экспериментально получен тип 1-1 (см. гл. 3).

Прогноз 6.

Сушка жидкого пластификатора на алюминиевой подложке при температуре 160 °С в конвективной сушилке.

Оцениваем факторы для модели мягких режимов:

$\Phi 1 = 1$ (по концентрации твердой фазы, см. гл. 2);

$\Phi 2 = 2$ (по лимитирующему размеру частиц, см. гл. 2);

$\Phi 3 = 3$ (по характерной форме частиц, см. гл. 2);

$\Phi 4 = 2$ (по характеру жидкой фазы, см. гл. 2);

$\Phi 5 = 3$ (теплоподвод – большой).

По модели получаем $КОВС = 10$, вид площадки $T_{м.т} - 3$.

Оцениваем факторы для модели жестких режимов:

$\Phi 1ж = 3$ (по характерной форме частиц, см. гл. 2);

$\Phi 2ж = 2$ (по лимитирующему размеру частиц, см. гл. 2);

$\Phi 3ж = 3$ (по характеру жидкой фазы, см. гл. 2);

$\Phi 4ж = 2$ (140 °С).

По модели получаем $КОВС = 9,5$ – вид площадки $T_{кип} - 2$.

По таблице 4.15 получаем для вида $T_{м.т} = 3$ и $T_{кип} = 2$ тип кинетической кривой по прогнозу – тип 3-1.

Экспериментально получен тип 3-1.

Следует также отметить, что, используя прогностическую модель, можно моделировать свойства и режимы сушки модельных продуктов, которые при высухании будут формировать заданные типы кинетических кривых.

5. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА КИНЕТИКИ СУШКИ

Полученная модель прогноза типа кинетической кривой сушки жидких дисперсных продуктов на подложках позволяет выработать инженерную методику расчета кинетики сушки на базе решения основного уравнения кинетики сушки с использованием связанной с типом кинетической кривой температурно-влажностной зависимости и полученных оценок кинетических параметров.

5.1. ВИДЫ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Установим связь типа кинетической кривой с видом температурно-влажностной зависимости применительно к кинетическим особенностям сушки жидких дисперсных продуктов на подложках.

Рассмотрим формирование температурно-влажностных зависимостей исходя из заданного режима сушки. Рассмотрим отдельно мягкие и жесткие режимы.

Мягкие режимы

Как было показано выше, для мягких режимов выделено пять видов площадки $T_{м.т.}$, соответствующих определенному типу и особенности кинетической кривой.

Температурно-влажностные зависимости для мягких режимов можно условно разделить на три участка. Участок № 1 – прогрев до площадки $T_{м.т.}$. Участок № 2 – район площадки $T_{м.т.}$. Участок № 3 – окончание процесса.

Общая схема температурно-влажностных зависимостей для мягких режимов сушки жидких дисперсных продуктов приведена на рис. 5.1.

Как правило, величина участка № 1 – незначительна. Этот участок можно описать линейной зависимостью (характер оценки этого участка далее).

Вид участка № 3 не изменяется для всех видов температурно-влажностных зависимостей, за исключением вида 5 – отсутствие площадки $T_{м.т.}$. Этот участок хорошо аппроксимируется гиперболической функцией или любой степенной или полиномиальной зависимостью.

Основной вклад в результат расчета кинетики сушки с использованием температурно-влажностных зависимостей оказывает участок № 2 – район площадки $T_{м.т.}$. Зависимость на этом участке – линейная, имеющая определенный угол наклона φ .

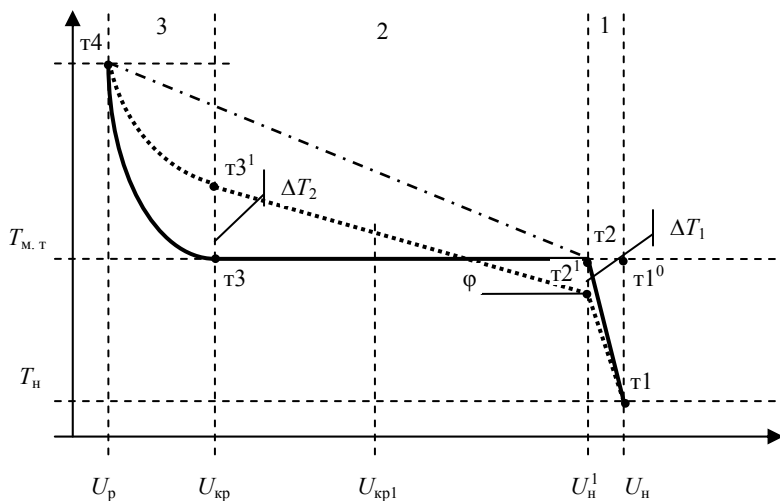


Рис. 5.1. Общая схема температурно-влажностных зависимостей для мягких режимов сушки жидких дисперсных продуктов

Как видно из рис. 5.1, с увеличением влияния структурообразования на кинетику сушки (т.е. фактически с усилением деформации площадки $T_{M.T}$) увеличивается наклон участка. При этом для вида площадки $T_{M.T}$ 5 имеем случай объединения участков № 2 и 3 в одну линейную зависимость.

Для инженерного расчета кинетики сушки рекомендуется выбор величины угла наклона ϕ (рекомендуемые значения получены статистической обработкой экспериментальных данных для рассмотренных факторов, влияющих на вид площадки) в зависимости от полученных в прогностической модели баллов. Для применения общей схемы ТВЗ в расчетах удобнее в оценке влияния структурообразования на вид площадки $T_{M.T}$ использовать не величину угла ϕ , а величину подъема площадки ΔT_i над ожидаемым значением $T_{M.T}$. Значения ΔT_i и ϕ легко пересчитываются.

Для выбора вида температурно-влажностных зависимостей необходимо определиться с характером участка № 1. Возможны следующие положения температурно-влажностных зависимостей по точкам:

- а) $t_1 - t_1^0$;
- б) $t_1 - t_2$;
- в) $t_1 - t_2^1$.

Как показали результаты расчета, для большинства видов температурно-влажностных зависимостей наилучший вариант получается при положениях б) и в) с соответствующей оценкой величины U_H^1 .

Соответственно, для мягких режимов возможен выбор следующих видов ТВЗ при движении по опорным точкам:

1 – t_1, t_2, t_3, t_4 ;

2 – t_1, t_2^1, t_3^1, t_4 ;

3 – t_1, t_1^0, t_4 ;

4 – t_1, t_4 (прямая линия на схеме условно не показана).

В таблице 5.1 представлено соответствие вида площадки, типа кинетической кривой и вида ТВЗ.

5.1. Соответствие вида площадки, типа кинетической кривой и вида ТВЗ

Вид площадки $T_{м.т}$	Тип кривой	Вид ТВЗ
1	1-0	1
2	1-2	2
3	1-1	2
4	1-1,2	3
5	2-0	4

Жесткие режимы

Для жестких режимов сушки, помимо выделения пяти видов площадки $T_{м.т}$, необходимо рассмотрение еще трех видов площадки $T_{кип}$, соответствующих определенному типу и особенности кинетической кривой.

Характер температурно-влажностных зависимостей для жестких режимов можно условно разделить на две зоны: 1 – зона площадки $T_{м.т}$, 2 – зона площадки $T_{кип}$. В каждой зоне соответственно выделяются следующие участки.

Для зоны 1: Участок № 1 – прогрев до соответствующей площадки $T_{м.т}$. Участок № 2 – район площадки $T_{м.т}$. Участок № 3 – прогрев до начала зоны 2 (площадки $T_{кип}$).

Для зоны 2: Участок № 4 – район площадки $T_{кип}$. Участок № 5 – окончание процесса (прогрев до конечной температуры).

На рисунке 5.2 представлена общая схема температурно-влажностных зависимостей для жестких режимов сушки.

Как видно из рис. 5.2, участки могут выделяться самостоятельно или объединяться между собой исходя из получаемого типа кинетических кривых.

Таким образом, характер температурно-влажностных зависимостей в районе площадки $T_{м.т}$ и площадки $T_{кип}$ имеет сходный характер и претерпевает сходные изменения.

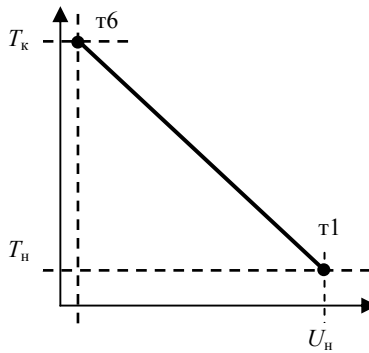
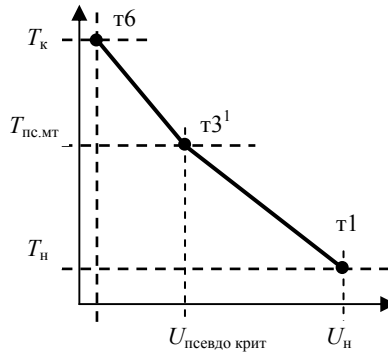
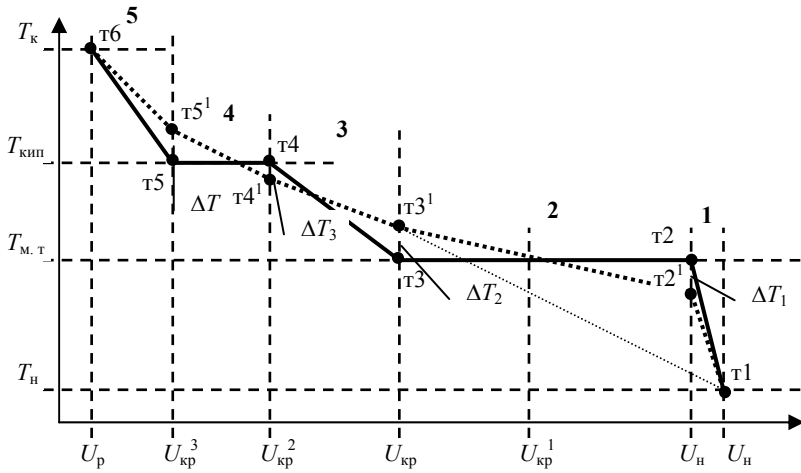


Рис. 5.2. Общая схема температурно-влажностных зависимостей для жестких режимов сушки

Величины ΔT_1 и ΔT_2 получаем оценкой, аналогичной мягким режимам. Для применения общей схемы температурно-влажностных зависимостей в расчетах для жестких режимов удобнее в оценке влияния структурообразования на вид площадки $T_{\text{кип}}$ использовать величину подъема площадок ΔT_3 и ΔT_4 над величиной $T_{\text{кип}}$ (для водных дисперсий – 100 °С).

Соответственно, для жестких режимов возможен выбор следующих видов температурно-влажностных зависимостей при движении по опорным точкам:

- 1 – $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$;
- 2 – $t_1, t_2, t_3, t_4^1, t_5^1, t_6$;
- 3 – t_1, t_2, t_3, t_6 ;
- 4 – $t_1, t_2^1, t_3^1, t_4, t_5, t_6$;
- 5 – $t_1, t_2^1, t_3^1, t_4^1, t_5^1, t_6$;
- 6 – t_1, t_2^1, t_3^1, t_6 ;
- 7 – $t_1, t_3^1, t_4, t_5, t_6$;
- 8 – $t_1, t_3^1, t_4^1, t_5^1, t_6$;
- 9 – t_1, t_3^1, t_6 ;
- 10 – t_1, t_6 .

В таблице 5.2 представлено соответствие вида площадки $T_{\text{м.т}}$, площадки $T_{\text{кип}}$, типа кинетической кривой и вида температурно-влажностных зависимостей для жестких режимов.

5.2. Соответствие вида площадки $T_{\text{м.т}}$, площадки $T_{\text{кип}}$, типа кинетической кривой и вида температурно-влажностных зависимостей для жестких режимов

Вид площадки $T_{\text{м.т}}$	Вид площадки $T_{\text{кип}}$	Тип кинетической кривой по классификации	Вид температурно-влажностных зависимостей
1	1	4-0	1
2	1	4-2	4
3	1	4-1	4
4	1	4-1,2	4
5	1	5-0	7
1	2	4-4(5,6?)	2
2	2	4-2,4(5,6?)	5
3	2	4-1,4(5,6?)	5
4	2	4-1,2,4(5,6?)	5
5	2	5-4(5,6?)	8

Вид площадки $T_{м.т}$	Вид площадки $T_{кип}$	Тип кинетической кривой по классификации	Вид температурно-влажностных зависимостей
1	3	3-0	3
2	3	3-2	6
3	3	3-1	6
4	3	3-1,2	6
5	3	6-0	9 или 10

5.2. РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ НА БАЗЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Метод расчета кинетики сушки на базе температурно-влажностных зависимостей хорошо зарекомендовал себя в работах проф. В. И. Коновалова по конвективной сушке кордных материалов [81 – 104]. Предлагаемая методика является развитием методики проф. В. И. Коновалова со следующими особенностями:

1. Выбор вида температурно-влажностных зависимостей осуществляется на основе прогноза типа кинетической кривой по разработанной в представленной работе прогностической модели. В старой методике рекомендовался выбор вида температурно-влажностных зависимостей на основе проведенных экспериментов, а для продуктов, не исследованных экспериментально, и для оценочных расчетов рекомендовалось использовать вид температурно-влажностных зависимостей, представленный на рис. 5.3.

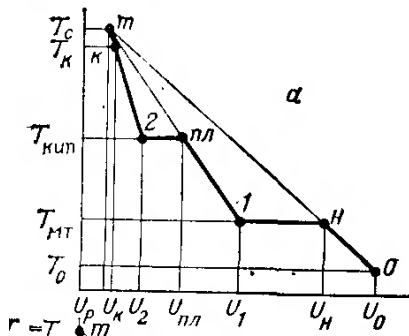


Рис. 5.3. Вид температурно-влажностных зависимостей, рекомендуемый старой методикой, для оценочных расчетов (по данным работы [91])

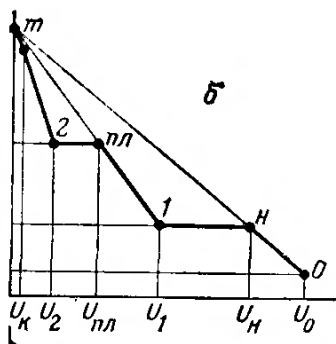


Рис. 5.4. Пример линейно-лучевой схемы (по данным работы [91])

Очевидно, что даже для грубой оценки кинетики сушки жидких продуктов на подложках такой подход будет давать неприемлемый результат.

2. В старой методике использовалась так называемая линейно-лучевая схема, когда определенные опорные точки температурно-влажностных зависимостей можно было получить пересечением прямых, проведенных через крайние точки температурно-влажностных зависимостей. При этом площадки $T_{м.т}$ и $T_{кип}$ были горизонтальными. Например, см. рис. 5.3, 5.4.

Однако, как показал анализ температурно-влажностных зависимостей, в случае сушки жидких дисперсных продуктов на подложках такая схема также дает неудовлетворительный результат. Поэтому в предлагаемой методике расчета кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках вводятся участки площадок $T_{м.т}$ и $T_{кип}$, которые в зависимости от типа кинетической кривой могут менять свой наклон. Соответствующие значения опорных точек оцениваются исходя из степени структурообразования, оцениваемой в баллах по прогностической модели типа кинетической кривой.

5.2.1. Основные зависимости, используемые для расчета опорных точек температурно-влажностных зависимостей

Расчет кинетики сушки на основе ТВЗ базируется на решении так называемого основного уравнения кинетики сушки:

$$-M_T r \frac{d\bar{U}}{d\tau} + M_T c \frac{d\bar{T}}{d\tau} = Q. \quad (5.1)$$

При заданном виде зависимости $T(U)$ уравнение (5.1) преобразуется к виду, удобному для численного интегрирования:

$$\tau = \int_{\bar{U}_{нз}}^{\bar{U}_{кз}} f(\bar{U}) d\bar{U}, \quad (5.2)$$

где $U_{к.з}$ и $U_{н.з}$ – границы участка интегрирования ТВЗ.

Фактически ТВЗ – это некоторая функция $T(U)$ определенного вида. Вид функции можно задать аналитически, можно – численно. Как показал анализ ТВЗ для мягких и жестких режимов сушки жидких дисперсных продуктов, всю ТВЗ необходимо разбить на определенные участки. В границах участка можно определить явный вид ТВЗ: линейный или нелинейный. В основном для упрощения расчетов можно использовать линейный вид ТВЗ.

Для линейной зависимости $T(U)$ вида $T = a + bU$ уравнение (5.2) имеет вид

$$\tau = \int_{\bar{U}_{нз}}^{\bar{U}_{кз}} \frac{-M_T r + M_T c b}{Q(\bar{U})} d\bar{U}. \quad (5.3)$$

Явный вид ТВЗ определяется исходя из получаемых значений опорных точек. Значения опорных точек можно получить по приведенным рекомендациям для мягких и жестких режимов.

Мягкие режимы

Положение точек t_1 и t_4 получаем по исходным данным.

Для первого участка оценим положение t_2^1 :

$$U_n^1 \approx (0,90 \dots 0,95) U_n.$$

Необходимо оценить величину $U_{кр}$. Для сушки капиллярно-пористых тел известна оценка величины $U_{кр} \approx 0,56 U_n$ [1]. В случае сушки жидких дисперсных продуктов на подложках для материалов слабо склонных к структурообразованию для инженерных расчетов можно рекомендовать $U_p \approx 0$, $U_{кр} \approx 0,1 U_n$. Для материалов, склонных к структурообразованию, для инженерных расчетов можно рекомендовать $U_p \approx 0,01 U_n$, $U_{кр} \approx (0,25 \dots 0,33) U_n$.

Для 2, 3 и 4-го видов площадки $T_{м.т}$ оценку ΔT_1 и ΔT_2 можно производить по данным табл. 5.3 (приведенные рекомендации основаны на статистической обработке экспериментальных данных для соответствующих видов кинетических кривых).

В общем случае для оценки ΔT_i рекомендуется использовать формулы (в диапазоне баллов от 6,5 до 13,5):

$$\Delta T_1 = 0,0476 \text{ КОВС}^2 - 0,6714 \text{ КОВС} + 3,4024;$$

$$\Delta T_2 = 0,1226 \text{ КОВС}^2 - 1,619 \text{ КОВС} + 6,3598.$$

5.3. Оценка ΔT_1 и ΔT_2 по данным прогностической модели

КОВС	6	11	14
ΔT_1	1	2	3
ΔT_2	1	4	7

Положение точек t_2 и t_3 (и соответственно t_2^1 и t_3^1) зависит от величины $T_{м.т}$. Расчет $T_{м.т}$ ведется по известным балансным соотношениям с учетом теплоподвода со стороны подложки. Соответственно значениям ΔT_1 и ΔT_2 получаем координаты точек t_2^1 и t_3^1 и явный вид зависимости $T(U)$ для каждого участка ТВЗ.

Жесткие режимы

Положение точек t_1 и t_6 получаем по исходным данным. Для 2, 3 и 4-го видов площадки $T_{м.т}$ оценку ΔT_1 и ΔT_2 можно производить по данным табл. 5.3. Соответственно получаем положение точек t_2 (t_2^1) и t_3 (t_3^1) (см. выше).

Для 2-го вида площадки $T_{кип}$ оценку ΔT_3 и ΔT_4 можно производить по данным табл. 5.4 (приведенные рекомендации основаны на статистической обработке экспериментальных данных для соответствующих видов кинетических кривых).

5.4. Оценка ΔT_3 и ΔT_4 по данным прогностической модели

КОВС	12	4
ΔT_3	2	12
ΔT_4	2	12

В общем случае для оценки ΔT_3 и ΔT_4 рекомендуется использовать формулу (в диапазоне баллов от 4 до 12):

$$\Delta T_i = -1,2487 \text{КОВС} + 16,948.$$

Величину $U_{кр2}$ и $U_{кр3}$ для инженерных расчетов можно рекомендовать $U_{кр3} \approx 0,01U_n$, $U_{кр2} \approx (0,15 \dots 0,2)U_n$ (на основании статистической обработки экспериментальных данных).

Таким образом, получаем положение точек t_4 (t_4^1) и t_5 (t_5^1).

Внешний теплообмен

Расчет величины коэффициентов тепло- и массотдачи ведем исходя из имеющихся критериальных уравнений, полученных в работах [94, 95, 118, 181 – 183] для различных условий сушки. Изменение ко-

эффицентен тепло- и массообмена в границах рассчитываемых участков можно аппроксимировать линейными зависимостями. Точнее это делать с использованием известных нелинейных зависимостей, например, для участка окончания процесса сушки можно использовать так называемую двухдуговую схему [94, 95]. Приведем вид критериальных уравнений, по которым производится расчет $\alpha_{\text{сух}}$, $\alpha_{\text{исп}}$ и $\beta_{\text{исп}}$, рекомендуемых для расчета кинетики сушки капель и тонких слоев жидких дисперсных продуктов на подложках [181 – 183]:

$$\text{Nu}_{\text{сух}} = 1,8\text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,333} ;$$

$$\text{Nu}_{\alpha} = 12,0\text{Re}^{0,33} \text{Pr}^{0,333} ;$$

$$\text{Nu}_{\beta} = 4,95\text{Re}^{0,37} \text{Sc}^{0,333} .$$

Определяющий размер: $d = 4(F_{\text{кан}} - F_{\text{обр}}) / (\Pi_{\text{кан}} + \Pi_{\text{обр}})$.

Определяющая температура – среднearифметическая температура пограничного слоя.

5.2.2. Алгоритм расчета кинетики сушки

Алгоритм инженерной методики расчета кинетики сушки жидких дисперсных продуктов следующий:

1. По прогностической модели оцениваем баллы для заданного продукта и режима сушки.
2. Определяем вид площадки (площадок) и соответствующий тип кинетической кривой.
3. По выбранному типу кинетической кривой выбираем подходящий вид ТВЗ (см. табл. 5.1 и 5.2).
4. По приведенным выше зависимостям и рекомендациям рассчитываем значения опорных точек. Получаем явный вид ТВЗ по участкам.
5. Рассчитываем значения коэффициентов внешнего тепло-массообмена.
6. В общем случае решаем уравнение (5.3) численно (возможно получение решения с использованием языков программирования или математических пакетов типа MathCAD).
7. Получаем численные зависимости вида $T(\tau)$ и $U(\tau)$.
8. Для дальнейшего анализа и расчета выписываем значения опорных точек в таблицу вида:

№ точки	T	U	τ

5.3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА КИНЕТИКИ СУШКИ

Покажем результаты расчета кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на мягких и жестких режимах для основных исследованных продуктов: мясо-костной жидкости, послеспиртовой барды и пластификатора бетона. Как было показано выше, эти продукты формируют разные типы кинетических кривых в сходных режимах сушки.

Пример расчета № 1 – Мясо-костная жидкость, мягкий режим сушки

Режим сушки – конвективная, $T_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $w = 5 \text{ м/с}$, подложка – фторопласт.

По прогностической модели для мягких режимов КОВС = 3.

Вид площадки $T_{м.т} - 1$.

Тип кинетической кривой – 1-0.

Вид ТВЗ (мягкие режимы) – 1.

$T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

$U_n = 8,75 \text{ кг вл./кг абс. сух.}$

$T_{м.т} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$ (расчетное).

$U_{кр} = 0,875 \text{ кг вл./кг абс. сух.}$ (расчетное).

$T_k = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

$U_k = 0 \text{ кг вл./кг абс. сух.}$ (расчетное).

Сравнение результатов расчета кинетики сушки по предлагаемой методике и данных эксперимента представлено в табл. 5.5.

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по температуре составило $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (1,25%).

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по влагосодержанию составило $0,09 \text{ кг вл./кг абс. сух.}$ (1%).

Расхождение расчетного и экспериментального общего времени сушки составило 18 с (2%).

5.5. Результаты расчета и эксперимента для сушки мясо-костной жидкости на мягком режиме сушки

№ точки	$T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$U_p, \text{ кг вл./кг абс. сух.}$	$U_{экс}, \text{ кг вл./кг абс. сух.}$	$\tau_p, \text{ с}$	$\tau_{экс}, \text{ с}$
1	20	20	8,750	8,750	0	0
2	37	36	8,050	8,125	98	100
3	37	36	0,875	0,785	543	550
4	80	80	0	0	912	920

Пример расчета № 2 – Мясо-костная жидкость, жесткий режим сушки

Режим сушки – конвективная, $T_c = 160\text{ }^\circ\text{C}$, $w = 5\text{ м/с}$, подложка – фторопласт.

Оценка КОВС по прогностической модели:

Для площадки $T_{м.т}$ (по модели мягких режимов с учетом сильного теплоподвода):

КОВС = 6. Вид площадки $T_{м.т} - 2$.

Для площадки $T_{кип}$ (по модели жестких режимов):

КОВС = 7. Вид площадки $T_{кип} - 3$.

Тип кинетической кривой – 3-2.

Вид ТВЗ (жесткие режимы) – 6.

$T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

$U_n = 8,75\text{ кг вл./кг абс. сух.}$

$T_{м.т} = 60\text{ }^\circ\text{C}$ (расчетное).

$\Delta T_3 = 1\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T_4 = 1\text{ }^\circ\text{C}$.

$U_{кр} = 0,875\text{ кг вл./кг абс. сух.}$

$T_k = 160\text{ }^\circ\text{C}$.

$U_k = 0\text{ кг вл./кг абс. сух.}$

Результаты расчета представлены в табл. 5.6.

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по температуре составило $2\text{ }^\circ\text{C}$.

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по влагосодержанию составило $0,06\text{ кг вл./кг абс. сух.}$

Расхождение расчетного и экспериментального общего времени сушки составило 25 с (7%).

5.6. Результаты расчета и эксперимента для сушки мясо-костной жидкости на жестком режиме сушки

№ точки	$T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$U_p,$ кг вл./кг абс. сух.	$U_{экс},$ кг вл./кг абс. сух.	$\tau_p, \text{ с}$	$\tau_{экс}, \text{ с}$
1	20	20	8,750	8,7500	0	0
2 ¹	59	60	8,050	8,0250	50	55
3 ¹	61	63	0,875	0,8125	168	175
6	160	160	0	0	432	457

Пример расчета № 3 – Послеспиртовая барда, мягкий режим сушки

Режим сушки – конвективная, $T_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $w = 5 \text{ м/с}$, подложка – фторопласт.

Оценка КОВС по прогностической модели для мягких режимов:

$$\text{КОВС} = 6,5.$$

Вид площадки – 2.

Тип кинетической кривой – 1-2.

Вид ТВЗ (мягкие режимы) – 2.

$$T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_n = 8,7 \text{ кг вл./кг абс. сух.}$$

$$T_{m.t} = 40 \text{ }^\circ\text{C (расчетное).}$$

$$\Delta T_1 = 1,1, \Delta T_2 = 1,1 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_{кр} = 2,61 \text{ кг вл./кг абс. сух. (расчетное).}$$

$$T_k = 80 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_k = 0 \text{ кг вл./кг абс. сух.}$$

Результаты расчета представлены в табл. 5.7.

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по температуре составило $2,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (3%).

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по влагосодержанию составило $0,125 \text{ кг вл./кг абс. сух.}$ (1,5%).

Расхождение расчетного и экспериментального общего времени сушки составило 16 с (3,3 %).

5.7. Результаты расчета и эксперимента для сушки исходной послеспиртовой барды на мягком режиме сушки

№ точки	$T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$U_p,$ кг вл./кг абс. сух.	$U_{экс},$ кг вл./кг абс. сух.	$\tau_p, \text{ с}$	$\tau_{экс}, \text{ с}$
1	20,0	20,0	8,700	8,700	0	0
2 ¹	38,9	39,0	8,050	8,125	58	60
3 ¹	41,1	43,5	2,610	2,715	203	210
4	80,0	80,0	0,087	0,076	496	480

Пример расчета № 4 – Послеспиртовая барда, жесткий режим сушки

Режим сушки – конвективная, $T_c = 160\text{ }^\circ\text{C}$, $w = 5\text{ м/с}$, подложка – фторопласт.

Оценка КОВС по прогностической модели:

Для площадки $T_{\text{мт}}$ (по модели мягких режимов с учетом сильного теплоподвода):

$$\text{КОВС} = 9,5.$$

Вид площадки $T_{\text{м.т}}$ – 3.

Для площадки $T_{\text{кип}}$ (по модели жестких режимов):

$$\text{КРВС} = 11.$$

Вид площадки $T_{\text{кип}}$ – 3.

Тип кинетической кривой – 3-1.

Вид ТВЗ (жесткие режимы) – 6.

$$T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_n = 8,7\text{ кг вл./кг абс. сух.}$$

$$T_{\text{м.т}} = 59,5\text{ }^\circ\text{C} \text{ (расчетное).}$$

$$\Delta T_1 = 2\text{ }^\circ\text{C}, \Delta T_2 = 4\text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_{\text{кр}} = 2,61\text{ кг вл./кг абс. сух. (расчетное).}$$

$$T_k = 160\text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_k = 0,087\text{ кг вл./кг абс. сух. (расчетное).}$$

Результаты расчета представлены в табл. 5.8.

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по температуре составило $14,9\text{ }^\circ\text{C}$ (9,3%).

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по влагосодержанию составило $0,75\text{ кг вл./кг абс. сух.}$ (8,6%).

Расхождение расчетного и экспериментального общего времени сушки составило 27 с (7%).

5.8. Результаты расчета и эксперимента для сушки исходной послеспиртовой барды на жестком режиме сушки

№ точки	$T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{экс}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$U_p,$ кг вл./кг абс. сух.	$U_{\text{экс}},$ кг вл./кг абс. сух.	$\tau_p, \text{ с}$	$\tau_{\text{экс}}, \text{ с}$
1	20,0	20,0	8,700	8,700	0	0
2 ¹	57,5	59,5	8,050	8,150	37	30
3 ¹	63,5	78,4	2,610	1,860	123	110
6	160,0	160,0	0,087	0,073	257	240

Пример расчета № 5 – Пластификатор бетона, мягкий режим сушки

Режим сушки – конвективная, $T_c = 75 \text{ }^\circ\text{C}$, $w = 7 \text{ м/с}$, подложка – фторопласт.

Оценка КОВС по прогностической модели для мягких режимов:

$$\text{КОВС} = 8.$$

Вид площадки – 3.

Тип кинетической кривой – 1-1.

Вид ТВЗ (мягкие режимы) – 2.

$$T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_n = 8,6 \text{ кг вл./кг абс. сух.}$$

$$T_{m.t} = 40 \text{ }^\circ\text{C (расчет)}.$$

$$\Delta T_1 = 1,2 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta T_2 = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_{кр} = 2,58 \text{ кг вл./кг абс. сух. (расчет)}.$$

$$T_k = 75 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_k = 0,086 \text{ кг вл./кг абс. сух. (расчет)}.$$

Результаты расчета представлены в табл. 5.9.

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по температуре составило $1,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (2,5%).

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по влагосодержанию составило $0,44 \text{ кг вл./кг абс. сух.}$ (5,1%).

Расхождение расчетного и экспериментального общего времени сушки составило 122 с (8,1%).

5.9. Результаты расчета и эксперимента для сушки жидкого пластификатора бетона на мягком режиме сушки

№ точки	$T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$U_p,$ кг вл./кг абс. сух.	$U_{экс},$ кг вл./кг абс. сух.	$\tau_p, \text{ с}$	$\tau_{экс}, \text{ с}$
1	20,0	20	8,600	8,60	0	0
2 ¹	38,8	37	7,920	8,03	217	250
3 ¹	41,5	43	2,580	2,14	498	550
4	75,0	75	0,086	0,11	1378	1500

Пример расчета № 6 – Пластификатор бетона, жесткий режим сушки

Режим сушки – конвективная, $T_c = 120\text{ }^\circ\text{C}$, $w = 2\text{ м/с}$, подложка – фторопласт.

Оценка КОВС по прогностической модели:

Для площадки $T_{м.т}$ (по модели мягких режимов с учетом сильного теплоподвода):

$$\text{КОВС} = 11.$$

$$\text{Вид площадки } T_{м.т} - 4.$$

Для площадки $T_{кнп}$ (по модели жестких режимов):

$$\text{КОВС} = 8.$$

$$\text{Вид площадки } T_{кнп} - 1.$$

$$\text{Тип кинетической кривой} - 4-1.$$

$$\text{Вид ТВЗ (жесткие режимы)} - 4.$$

$$T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_n = 8,6\text{ кг вл./кг абс. сух.}$$

$$T_{м.т} = 45,4\text{ }^\circ\text{C (расчет)}.$$

$$\Delta T_1 = 2\text{ }^\circ\text{C}, \Delta T_2 = 4\text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_{кр} = 2,58\text{ кг вл./кг абс. сух. (расчет)}.$$

$$T_k = 120\text{ }^\circ\text{C}.$$

$$U_k = 0,086\text{ кг вл./кг абс. сух. (расчет)}.$$

Результаты расчета представлены в табл. 5.10.

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по температуре составило $7,9\text{ }^\circ\text{C}$ (6,5%).

Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных по влагосодержанию составило $0,34\text{ кг вл./кг абс. сух.}$ (4%).

Расхождение расчетного и экспериментального общего времени сушки составило 198 с (9,7%).

5.10. Результаты расчета и эксперимента для сушки жидкого пластификатора бетона на жестком режиме сушки

№ точки	$T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{экс}, \text{ }^\circ\text{C}$	$U_p,$ кг вл./кг абс. сух.	$U_{экс},$ кг вл./кг абс. сух.	$\tau_p, \text{ с}$	$\tau_{экс}, \text{ с}$
1	20,0	20,0	8,600	8,600	0	0
2 ¹	43,4	48,5	8,300	8,100	118	150
3 ¹	47,4	55,3	2,580	2,240	303	320
4	100,0	102,0	1,290	1,540	974	1000
5	100,0	102,0	0,086	0,095	1325	1500
6	120,0	120,0	0,086	0,094	1852	2050

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении последних 20 лет авторами проводились обширные исследования кинетики сушки жидких дисперсных продуктов природного и синтетического происхождения в промышленных диапазонах режимных параметров. Выявлено, что продукты со сходными концентрациями влаги и теплофизическими свойствами (плотность, вязкость, теплоемкость), но с разным фракционным составом и формами частиц дисперсной фазы формируют разные кинетические кривые сушки. Разработана классификация типов и особенностей кинетических кривых сушки жидких дисперсных продуктов на подложках.

Выявленные эффекты структурообразования на поверхности высушающих жидких дисперсных продуктов и их лимитирующее влияние на кинетику сушки позволили предложить критерий оценки возможности структурообразования и разработать прогностическую модель, позволяющую оценить тип кинетической кривой.

В таблице 31 приведены оценочные значения ошибки прогнозирования типа кинетической кривой для мягких и жестких режимов сушки в диапазоне изменения влияющих параметров.

31. Оценочные значения ошибки прогнозирования типа кинетической кривой

<i>Мягкие режимы</i>	
Вид площадки $T_{м.т}$	Средняя ошибка
1	0,102
2	0,081
3	0,057
4	0,031
5	0,030

<i>Жесткие режимы</i>	
Вид площадки $T_{кип}$	Средняя ошибка
1	0,126
2	0,072
3	0,044

С использованием прогностической модели типа кинетической кривой разработана инженерная методика расчета кинетики сушки на базе температурно-влажностных зависимостей.

Температурно-влажностные зависимости являются фактически некоторыми интегральными характеристиками процесса сушки, учитывающими внешний и внутренний теплообмен и явления структурообразования. Разбивка процесса на зоны (участки), в которых ТВЗ имеет определенный вид, позволяет учесть лимитирующие процесс сушки явления. Например, в первом периоде – поверхностное испарение, осложненное формированием пленки, уменьшающей интенсивность испарения по сравнению со свободной поверхностью.

Для жидких дисперсных продуктов, проявляющих большую склонность к структурообразованию, расхождение экспериментальных и расчетных данных по предлагаемой методике больше, чем у продуктов, не склонных к структурообразованию в процессе сушки. Как видно из полученных результатов, наибольшая точность расчета наблюдается для мягких режимов (максимальное расхождение по общему времени сушки не превышает 8,1%). В жестких режимах расхождение между экспериментальными и расчетными данными несколько больше (9,7%).

В используемой до настоящего времени методике [85, 87] погрешность расчета времени сушки для отдельных участков и процесса в целом составляла от 10 до 20%. Разработанные подходы, учитывающие структурообразование в процессе сушки, позволили повысить точность расчетов. Расхождение экспериментального и расчетного времени сушки не превышает 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лыков, А. В.** Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.
2. **Лыков, А. В.** Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 296 с.
3. **Лыков, А. В.** Теплообмен : справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
4. **Лыков, А. В.** Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
5. **Методы** определения теплопроводности и температуропроводности / под. ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
6. **Берд, Р.** Явления переноса / Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут. – М. : Химия, 1974. – 688 с.
7. **Кришер, О.** Научные основы техники сушки / О. Кришер. – М. : Издательство, 1961. – 540 с.
8. **Сажин, Б. С.** Основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М. : Химия, 1984. – 320 с.
9. **Сажин, Б. С.** Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин, В. Б. Сажин. – М. : Наука, 1997. – 448 с.
10. **Федосов, С. В.** Применение методов теории теплопроводности для моделирования процессов конвективной сушки / С. В. Федосов, В. Н. Кисельников, Т. У. Шертаев. – Алма-Ата : Гылым, 1992. – 167 с.
11. **Муштаев, В. И.** Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М. : Химия, 1988. – 352 с.
12. **Акулич, П. В.** Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 443 с.
13. **Фролов, В. Ф.** Моделирование сушки дисперсных материалов / В. Ф. Фролов. – Л. : Химия, 1987. – 208 с.
14. **Фролов, В. Ф.** Растворение дисперсных материалов / В. Ф. Фролов // ТОХТ. – 1998. – Т. 32, № 4. – С. 398 – 410.
15. **Фролов, В. Ф.** Физико-химические процессы в псевдооживленном слое / В. Ф. Фролов // В справочнике «Псевдооживление». – М. : Химия, 1991. – С. 156 – 189.
16. **Кошляков, Н. С.** Основные дифференциальные уравнения математической физики / Н. С. Кошляков. – М. : Гостехиздат, 1933. – 512 с.
17. **Проблема** тепло- и массопереноса : сборник. – Минск : Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова АН БССР, 1976. – 310 с.

18. **Котляр, Я. М.** Методы математической физики и задачи гидроаэродинамики : учеб. пособие для втузов / Я. М. Котляр. – М. : Высшая школа, 1991. – 208 с.
19. **Зайдель, А. Н.** Погрешности измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1985. – 112 с.
20. **Зайдель, А. Н.** Элементарные оценки ошибок измерений / А. Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1978. – 96 с.
21. **Беляев, Н. М.** Методы теории теплопроводности. В 2 т. / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – М. : Высшая школа, 1982. – 612 с.
22. **Дульнев, Г. Н.** Теплопроводность смесей и композитных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
23. **Дульнев, Г. Н.** Процессы переноса в неоднородных средах / Г. Н. Дульнев, В. В. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
24. **Дульнев, Г. Н.** Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. – М. : Высшая школа, 1990. – 207 с.
25. **Пехович, А. И.** Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л. : Энергия, 1976. – 352 с.
26. **Бек, Дж.** Некорректные обратные задачи теплопроводности / Дж. Бек, Б. Блакуэлл, Ч. Сент-Клэр, мл. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 312с.
27. **Гегузин, Я. Е.** Капля / Я. Е. Гегузин. – М. : Наука, 1973. – 125 с.
28. **Гегузин, Я. Е.** Пузыри / Я. Е. Гегузин.. – М. : Наука, 1985. – 174 с.
29. **Конвективный** тепло- и массоперенос: Единое описание для течения в каналах и внешнего обтекания тел любой формы и расположения / В. Каст, О. Кришер, Г. Райнике, К. Винтермантель. – М. : Энергия, 1980. – 49 с.
30. **Рудобашта, С. П.** Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М. : Химия, 1980. – 248 с.
31. **Рудобашта, С. П.** Кинетический расчет процесса конвективной сушки дисперсных материалов / С. П. Рудобашта // IV Минский Международный форум. Т. 9. Тепломассообмен в процессах сушки. – Минск, 2000. – С. 41 – 48.
32. **Рудобашта, С. П.** Диффузия в химико-технологических процессах : учеб. пособие / С. П. Рудобашта, Э. М. Карташов. – М., 2010. Сер. Для высшей школы (2-е изд., перераб. и доп.)
33. **Рудобашта, С. П.** Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов / С. П. Рудобашта // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2000. – № 4. – С. 98.
34. **Рудобашта, С. П.** Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление конвективной сушки дисперсных полимерных материалов /

С. П. Рудобашта, В. М. Дмитриев // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, № 3. – С. 51 – 60.

35. **Массопроводность** при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов / С. П. Рудобашта, Г. А. Зуева, В. М. Дмитриев, Н. А. Зуев // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57, № 1. – С. 103 – 107.

36. **Расчет процесса** сушки гранул поликапроамида / С. П. Рудобашта, М. К. Кошелева, К. Э. Разумеев, А. В. Пичугин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56, № 12. – С. 118 – 123.

37. **К вопросу описания** процесса сушки полимеров уравнением молекулярной диффузии / А. М. Климов, С. П. Рудобашта, В. М. Нечаев, Ю. А. Тепляков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 334 – 338.

38. **Рудобашта, С. П.** Кинетический расчет сушилок / С. П. Рудобашта // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина». – 2010. – № 2. – С. 55 – 59.

39. **Рудобашта, С. П.** Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов / С. П. Рудобашта // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 705 – 714.

40. **Гухман, А. А.** Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена. – М. : Высшая школа, – 1967. – 303 с.

41. **Русанов, А. И.** Поверхностное разделение веществ: теория и методы / А. И. Русанов, С. А. Левичев, В. Т. Жаров. – Л. : Химия, 1981. – 184 с.

42. **Русанов, А. И.** Фазовые равновесия и поверхностные явления / А. И. Русанов. – Л. : Химия, 1967. – 388 с.

43. **Русанов, А. И.** Лекции по термодинамике поверхностей / А. И. Русанов. – М. : Лань, 2013. – 240 с.

44. **Современная** теория капиллярности / под ред. А. И. Русанова и Ф. Ч. Гудрича. – Л. : Химия, 1980. – 344 с.

45. **Урьев, Н. Б.** Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов / Н. Б. Урьев. – М. : Химия, 1988. – 256 с.

46. **Вода** в дисперсных системах / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, Ф. Д. Овчаренко и др. – М. : Химия, 1989. – 288 с.

47. **Дерягин, Б. В.** Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. – М. : Наука, 1985. – 398 с.

48. **Чураев, Н. В.** Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н. В. Чураев. – М. : Химия, 1990. – 272 с.

49. **Дерягин, Б. В.** Смачивающие пленки / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
50. **Дерягин, Б. В.** Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок / Б. В. Дерягин. – М. : Наука, 1986. – 206 с.
51. **Макрокинетика** процессов в пористых средах / Ю. А. Чизмаджев, В. С. Маркин, М. Р. Тарасевич, Ю. Г. Чирков. – М. : Наука, 1971. – 364 с.
52. **Дмитрович, А. Д.** Тепло- и массообмен при твердении бетона в паровой среде / А. Д. Дмитрович. – М. : Издательство литературы по строительству, 1967. – 243 с.
53. **Румшицкий, Л. З.** Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшицкий. – М. : Наука, 1971. – 192 с.
54. **Фролов, Ю. Г.** Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю. Г. Фролов. – М. : Химия, 1988. – 464 с.
55. **Мягченков, В. А.** Поверхностные явления и дисперсные системы / В. А. Мягченков. – 2-е изд., перераб. – М. : КолосС, 2007. – 187 с.
56. **Практикум** и задачник по коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / В. В. Назаров, А. С. Гродский, А. Ф. Моргунов, Н. А. Шабанов. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 374 с.
57. **Расчеты** и задачи по коллоидной химии / В. И. Баранова, Е. Е. Бибик, Н. М. Кожевникова, В. А. Малов. – М. : Высшая школа, 1989. – 288 с.
58. **Лабораторные работы** и задачи по коллоидной химии / под ред. Ю. Г. Фролова и А. Г. Гродского. – М. : Химия, 1986. – 216 с.
59. **Ребиндер, П. А.** Поверхностные явления в дисперсных системах / П. А. Ребиндер. – М. : Наука, 1979. – 384 с.
60. **Урьев, Н. Б.** Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / Н. Б. Урьев, П. А. Ребиндер. – М. : Наука, 1979. – 136 с.
61. **Измайлова, В. Н.** Структурообразование в белковых системах / В. Н. Измайлова, П. А. Ребиндер. – М. : Наука, 1974. – 268 с.
62. **Сумм, Б. Д.** Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М. : Химия, 1976. – 232 с.
63. **Зонтаг, Г.** Коагуляция и устойчивость дисперсных систем / Г. Зонтаг, К. Штрэнге. – М. : Химия, 1978. – 152 с.
64. **Юрьева, Л. А.** Структуры пленок из лаков физического отверждения / Л. А. Юрьева, О. И. Иваненко, В. П. Савельянов // Успехи в химии и химической технологии : сб. науч. тр. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. – Т. XIX, № 6(54). – С. 67 – 70.

65. **Савилова, О. С.** Экспериментальные доказательства нелинейного динамического характера процессов формирования полимерных пленок из растворов и дисперсий полимеров / О. С. Савилова, О. И. Иваненко, В. П. Савельянов // Химическая технология полимерных материалов. – 2007. – Т. 21, № 6(74). – С. 43 – 46
66. **Займан, Дж.** Модели беспорядка / Дж. Займан. – М. : Мир, 1982. – 591 с.
67. **Туницкий, Н. Н.** Диффузия и случайные процессы / Н. Н. Туницкий. – Новосибирск : Наука, 1970. – 165 с.
68. **Яминский, В. В.** Коагуляционные константы в дисперсных системах / В. В. Яминский. – М. : Химия, 1982. – 185 с.
69. **Шукин, Е. Д.** Поверхностные силы и граничные слои жидкости / Е. Д. Шукин, Е. А. Амелина, В. В. Яминский. – М. : Наука, 1984. – С. 23 – 29.
70. **Тамару, К.** Капиллярная химия / К. Тамару. – М. : Мир, 1983. – 272 с.
71. **Ефремов, И. Ф.** Периодические коллоидные структуры / И. Ф. Ефремов. – Л. : Химия, 1971. – 192 с.
72. **Уилкинсон, У. Л.** Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен / У. Л. Уилкинсон : пер. с англ. ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Мир, 1964. – 234 с.
73. **Бартенев, Г. М.** Физико-химическая механика дисперсных структур / Г. М. Бартенев, Н. В. Ермилова. – М. : Наука, 1966. – 371 с.
74. **Адамсон, А.** Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М. : Мир, 1979. – 568 с.
75. **Ван-Дайк, М.** Альбом течений жидкости и газа / М. Ван-Дайк. – М. : Мир, 1986. – 184 с.
76. **Болатбаев, К. Н.** Идентификация и физико-химические свойства лигносульфонатов в растворах / К. Н. Болатбаев, Т. Н. Луговицкая, А. В. Колосов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 3. – С. 308 – 312.
77. **Сумм, Б. Д.** Основы коллоидной химии / Б. Д. Сумм. – М. : ИЦ «Академия», 2013. – 240 с.
78. **Чудновский, А. Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский. – М. : Изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 456 с.
79. **Васильев, Л. Л.** Теплофизические свойства пористых материалов / Л. Л. Васильев, С. А. Танаева. – Минск : Наука и техника, 1974. – 265 с.
80. **Хейфец, Л. И.** Многофазные процессы в пористых телах / Л. И. Хейфец, А. В. Неймарк. – М. : Химия, 1982. – 320 с.
81. **Коновалов, В. И.** Особенности интенсивной сушки материалов, пропитанных дисперсиями или растворами / В. И. Коновалов,

А. Г. Двойнин, Е. Н. Туголуков // Тепломассообмен – ММФ : избр. докл. Междунар. форума. – Минск : ИТМО, 1989. – Секц. 6, 7. – С. 152 – 165.

82. **Коновалов, В. И.** Базовые кинетические характеристики массообменных процессов / В. И. Коновалов // ЖПХ. – 1986. – Т. 59, № 9. – С. 2096 – 2107.

83. **Серия** статей по расчету сушильных процессов на базе соотношений теплопереноса / В. И. Коновалов и др. // ТОХТ. – 1975 – 1978 гг.: 9(2). – С. 203 – 209; (4). – С. 501 – 510; (6). – С. 834 – 843; 11(5). – С. 769 – 771; 12(3). – С. 337 – 346.

84. **Серия** статей по пропиточно-сушильным процессам / В. И. Коновалов и др. // Каучук и резина. – 1975. – № 6. – С. 31 – 34; № 8. – С. 39 – 43; 1977. – № 6. – С. 39 – 41; № 9. – С. 20 – 24; № 12. – С. 33 – 37.

85. **Коновалов, В. И.** Исследование процессов пропитки и сушки кордных материалов и разработка пропиточно-сушильных аппаратов резиновой промышленности : дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08. – Л. : ЛТИ им. Ленсовета, 1976. – 415 с.

86. **Коновалов, В. И.** К методике расчета воздушных конвективных сушилок / В. И. Коновалов // Труды ВНИИРТмаша. – Тамбов : ВНИИРТмаш, 1967. – Вып. 1. – С. 78 – 109.

87. **Коновалов, В. И.** Расчет кинетики процессов сушки на базе соотношений теплопереноса : метод. указания / В. И. Коновалов – Тамбов : ТИХМ, 1978. – 32 с.

88. **Коновалов, В. И.** Серия проблемных докладов на регулярных Международных форумах по тепло- и массообмену / В. И. Коновалов. – Минск : ИТМО им. А. В. Лыкова, 1985. – Ч. 2. – С. 128 – 147; 1988. – Секц. 10–11. – С. 155 – 169; 1992 – не публиковался; 1996, Проблемные доклады. Секц. 8: Физические особенности и кинетика процессов тепломассообмена при сушке материалов от органических растворителей. Секц. 11: Циклические тепломассообменные процессы в химико-технологических устройствах.

89. **Коновалов, В. И.** Тепломассообмен в системах газ-дисперсная твердая фаза / В. И. Коновалов // Тепломассообмен-VII : проблемные докл. VII Всесоюз. конф. по тепломассообмену. – Минск : ИТМО АН СССР, 1985. – Ч. 2. – С. 128 – 147.

90. **Коновалов, В. И.** О возможностях использования циклических тепловых и взаимосвязанных теплодиффузионных процессов в химических и других производствах / В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова, Е. Н. Туголуков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1995. – Т. 1, № 3-4. – С. 273 – 288.

91. **Коновалов, В. И.** Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / В. И. Коновалов, А. М. Коваль. – М. : Химия, 1989. – 224 с.

92. **Исследование** кинетики сушки и нагрева пропитанных кордшнуров, корда и тканей / В. И. Коновалов, В. М. Нечаев, А. П. Пасько, В. Н. Соколов // *Каучук и резина*. – 1977. – № 2. – С. 20 – 23.

93. **Коновалов, В. И.** О возможностях использования точных, интервальных и приближенных аналитических методов в задачах тепло- и массопереноса в твердых телах / В. И. Коновалов, Е. Н. Туголуков, Н. Ц. Гагапова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 1995. – Т. 1, № 1-2. – С. 75 – 90.

94. **К расчету** внутреннего тепло- и массопереноса и кинетики сушки и нагрева волокнистых материалов / В. И. Коновалов, Е. Н. Туголуков, Н. Ц. Гагапова и др. // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 1997. – Т. 3, № 3. – С. 224 – 236.

95. **К расчету** внешнего тепломассообмена при сушке и нагреве волокнистых материалов / В. И. Коновалов, С. С. Хануни Самех, Е. Н. Туголуков и др. // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 1997. – Т. 3, № 1-2. – С. 47 – 60.

96. **О влиянии режимов** высушивания и нагревания на кинетику химических превращений в пленке адгезива / В. И. Коновалов, И. Л. Шмурак, Л. С. Дудакова, В. Б. Коробов // *Каучук и резина*. – 1977. – № 12. – С. 33 – 37.

97. **Коновалов, В. И.** Базовые кинетические характеристики массообменных процессов / В. И. Коновалов // *ЖПХ*. – 1986. – Т. 59, № 9. – С. 2096 – 2107.

98. **Konovalov, V. I.** Guest Editorial. Drying R&D Needs: Basic Research in Drying of Capillary-Porous Materials / V. I. Konovalov // *Drying Technology – an Intern. Journal*. – 2005. – V. 23, N 12. – P. 2307 – 2311.

99. **Konovalov, V. I.** Some Generalized and Particular Issues on Modeling of Complex Drying Processes Based on Temperature-Moisture Relationships: in 3 parts / V. I. Konovalov, T. Kudra, N. Z. Gatapova // 17th Intern. drying symposium (IDS-2010), Magdeburg, Germany, 3 – 6 October 2010. – Magdeburg, 2010. – 1. General statements. – Vol. A. – P. 478 – 485; 2. Specific Targets. Thermally-Thin Bodies. – Vol. A. – P. 248 – 256; 3. Specific Targets. Drying with Essential Temperature Kinetics. – Vol. B. – P. 786 – 794.

100. **Коновалов, В. И.** Геометрия, циркуляция и тепломассоперенос при испарении капли на подложке / В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 371 – 387.

101. **Современные** аналитические подходы к энергосбережению. Интегрированный подход. Пинч-анализ. Луковичная модель / В. И. Коновалов, Т. Кудра, А. Н. Пахомов, А. Ю. Орлов // *Вестник*

Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 560 – 578.

102. **Коновалов, В. И.** Математическое моделирование взаимосвязанных процессов сушки и нагрева. Материалы с близкими диффузионными и термическими сопротивлениями: единый подход / В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова, А. Н. Пахомов // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-15) : тр. XV Междунар. конф. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – Т. 3, секц. 3. – С. 170 – 176.

103. **Drying kinetics of liquid dispersions from thin organic syntheses on various substrates** / V. I. Konovalov, N. Z. Gatapova, A. N. Shikunov et al. // *Proceedings, 13th International Drying Symposium, Beijing, China, August 28 – 31, 2002.* – Vol. A. – P. 226 – 231.

104. **Kinetics of conductive drying and heat-transfer on contact cylinders** / V. I. Konovalov, N. Z. Gatapova, A. N. Koliuch et al. // *Proc. of the 14th Intern. Drying Symp. (IDS'2004). Brazil, Aug. 22 – 25, 2004.* – Vol. A. – P. 247 – 253.

105. **Drying of Dispersed Systems in Thin Layers – Process Mechanism and Kinetics** / V. I. Konovalov, A. N. Pakhomov, N. Z. Gatapova, T. Kudra // *12th Internat. Drying Symposium IDS'2000.* – Netherland, 2000. – Amsterdam : Elsevier Science, 2000. – Abstracts, Papers CD-ROM. – Report N 397. – 6 p.

106. **Коновалов, В. И.** Экспериментальная установка для исследования кинетики процессов сушки и испарения растворителей / В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова, Б.Ш.Д. Аль Саиди // *Вестник Тамбовского государственного технического университета.* – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 97 – 102.

107. **Гатапова, Н. Ц.** Кинетические особенности испарения растворителей нефтехимии и сушка покрытий на их основе / Н. Ц. Гатапова, Б.Ш.Д. Аль Саиди, Е. А. Сергеева // *Вестник Тамбовского государственного технического университета.* – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 378 – 382.

108. **Коновалов, В. И.** Сушка с тепловыми насосами в химической промышленности: возможности и экспериментальная техника / В. И. Коновалов, Е. В. Романова, Н. Ц. Гатапова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета.* – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 153 – 178.

109. **Коновалов, В. И.** Сушка и другие технологические процессы с вихревой трубой Ранка–Хилша: возможности и экспериментальная техника / В. И. Коновалов, А. Ю. Орлов, Н. Ц. Гатапова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета.* – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 803 – 825.

110. **Коновалов, В. И.** Новые зарубежные исследования в области сушки и термовлажностной обработки материалов: результаты и тенденции / В. И. Коновалов, Т. Кудра, Н. Ц. Гатапова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 530 – 537.

111. **Коновалов, В. И.** Современные вопросы теории переноса при сушке / В. И. Коновалов, Т. Кудра, Н. Ц. Гатапова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 538 – 559.

112. **Коновалов, В. И.** Основные пути энергосбережения и оптимизации в теплообменных процессах и оборудовании / В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 796 – 811.

113. **Патент** на изобретение RUS 2245348. 18.08.2003. Инертный носитель для сушки продуктов в псевдооживленном слое («Бинарный инерт») / В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова, А. Н. Шихунов и др.

114. **Коновалов, В. И.** Кинетические особенности, классификация и методика расчетов процессов сушки суспензий и кристаллообразующих растворов / В. И. Коновалов, Т. Кудра, Н. Ц. Гатапова // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2005. – Т. 48, № 4. – С. 119.

115. **Гатапова, Н. Ц.** Комплексная методология экспериментальных исследований и теплофизических измерений в процессах сушки материалов с существенной температурной кинетикой / Н. Ц. Гатапова, В. И. Коновалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 1. – С. 133 – 150.

116. **Gatapova, N. Ts.** Analysis and optimization of thermal conditions for the treatment of articles on continuous rotary-conveyer and rotary production lines / N. Ts. Gatapova, V. I. Konovalov, E. N. Tugolukov // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 5. – С. 3 – 7.

117. **Коновалов, В. И.** Макрокинетика промышленных процессов / В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова // Теоретические основы химической технологии. – 2004. – Т. 38, № 2. – С. 123 – 132.

118. **Гатапова, Н. Ц.** Кинетика и моделирование процессов сушки растворителей, покрытий, дисперсий, растворов и волокнистых материалов: единый подход : дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08. – защищена 10.06.2005. – Тамбов, 2005. – 554 с.

119. **Гатапова, Н. Ц.** Единый подход к кинетике и моделированию сушки растворителей, покрытий, жидких дисперсий, кристаллообразующих растворов и волокнистых материалов / В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. (Препринт Вестник Тамб. гос. техн. ун-та / Тамб. гос. техн. ун-т. – Препринт № 09. Рубрика 02. – 2004. – Т. 10, № 1. – 64 с.)

120. **Пахомов, А. Н.** Возможности самоорганизации дисперсных систем при сушке на подложке / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Е. А. Ильин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3, – С. 633 – 637.
121. **Пахомова, Ю. В.** Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю. В. Пахомова, В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70 – 82.
122. **Пахомов, А. Н.** Расчет кинетики сушки капли жидкости на подложке / А. Н. Пахомов, Б.Ш.Д. Аль Саиди, Е. А. Ильин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 2, – С. 339 – 345.
123. **Пахомов, А. Н.** Алгоритм расчета кинетики испарения капли с диффузионно-непроницаемой подложки / А. Н. Пахомов, Е. А. Ильин // Вопросы современной науки и практики. – Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2(45). – С. 292 – 296.
124. **Пахомов, А. Н.** Интенсификация процесса сушки жидкой послеспиртовой барды в аппарате с кипящим слоем инертных тел / А. Н. Пахомов, Н. С. Сорокина, А. В. Баландина // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4. – URL : ivdon.ru/magazine/archive/n4y2014/2727
125. **Пахомов, А. Н.** Типы кинетических кривых, получаемых при сушке капель жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Химическая технология. – 2014. – № 10. – С. 620 – 623.
126. **О температурных площадках** при высокотемпературной кондуктивно-барабанной сушке влажных материалов / Н. Ц. Гатапова, В. И. Коновалов, А. Н. Колиух, А. Н. Пахомов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2004. – Т. 10, № 4-1. – С. 968 – 977.
127. **Оценка** возможности энергосбережения в технологии производства молока / А. С. Гордеев, А. Ю. Астапов, С. Ю. Астапов и др. // Вестник МичГАУ. – 2013. – № 3. – С. 56 – 60.
128. **Интенсификация** теплоотдачи на алюминиевых поверхностях путем окислирования их наномодифицированными электролитами / А. А. Гравин, Ю. В. Литовка, Е. Н. Туголуков и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 4, – С. 928 – 935.
129. **Теплофизические** и кинетические особенности сушки дисперсий и кристаллообразующих растворов / Н. Ц. Гатапова, В. И. Коновалов, А. Н. Шикун и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9, № 2. – С. 210 – 229.

130. **Оценка** кинетических характеристик процесса сушки жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Е. А. Хатунцева, В. А. Елизарова и др. // В мире научных открытий. – 2015. – № 4.1(64). – С. 653 – 661.

131. **Некоторые особенности** сушки пастообразных материалов на подложках / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Е. А. Хатунцева, В. А. Елизарова // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2, ч. 2. – URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3017

132. **Пахомов, А. Н.** К расчету кинетики нагрева и сушки многослойных дисперсных продуктов на подложках / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 279 – 288.

133. **Анализ свойств** жидкой послеспиртовой барды / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, И. Г. Елисеева, Е. А. Черных // Наука в центральной России. – 2013. – № 2. – С. 57 – 61.

134. **Возможности** повышения энергоэффективности утилизации жидкой послеспиртовой барды / А. Н. Пахомов, Е. А. Ильин, А. В. Баландина и др. // Научно-производственный периодический журнал, спецвыпуск по итогам международной конференции «Достижения европейской науки», Наука в центральной России. – 2012. – С. 15 – 17.

135. **Пахомов, А. Н.** Применение цифрового микроскопа для оценки дисперсного состава жидкой послеспиртовой барды / А. Н. Пахомов, А. В. Баландина, Л. А. Козлова // Потенциал современной науки. – 2014. – № 6. – С. 19 – 22.

136. **Экспериментальная установка** для изучения кинетики формирования отложений на стенках теплообменных аппаратов / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, Е. А. Черных, Е. Ю. Ловягина // Новый университет. – 2014. – № 03-04(25-26). – С. 93 – 95.

137. **Сорокина, Н. С.** Влияние кислотности суперпластификаторов на содержание воздуха в бетонной смеси / Н. С. Сорокина, А. Н. Пахомов, Е. А. Хатунцева // Новый университет. – 2014. – № 03-04(25-26). – С. 96 – 99.

138. **Сорокина, Н. С.** Влияние суперпластификаторов на свойства бетонной смеси / Н. С. Сорокина, А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – № 06(65). – С. 142 – 144.

139. **Влияние внешних** воздействий на изменение термпарой при сушке капель жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Л. А. Козлова, Е. А. Хатунцева, А. В. Баландина // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – № 04(63). – С. 103–104.

140. **К вопросу моделирования** сушки дисперсных систем на твердых подложках / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, Е. А. Черных,

Е. Ю. Ловягина // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 3-1. – С. 62 – 64.

141. **Влияние температуры** сушильного агента на кинетику сушки суспензий и кристаллообразующих растворов в кипящем слое бинарного инерта / А. Н. Пахомов, С. Г. Волостных, А. Г. Ельцов, А. С. Шуваев // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 4-1. – С. 90 – 93.

142. **Экспериментальная установка** для сушки жидких дисперсных продуктов в кипящем слое инертных тел / А. Н. Пахомов, С. Г. Волостных, А. Г. Ельцов, А. С. Шуваев // Новый университет. Серия: Технические науки. – 2015. – № 3-4(37-38). – С. 97 – 100.

143. **Влияние формы** сепарационного пространства сушилки на размер частиц высушенного продукта / А. Н. Пахомов, С. Г. Волостных, А. Г. Ельцов, А. С. Шуваев // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2015. – № 3(16). – С. 15–16.

144. **Характер поведения** бинарного инерта в сушилке с кипящим слоем / А. Н. Пахомов, С. Г. Волостных, А. Г. Ельцов, А. С. Шуваев // Science Time. – 2015. – № 3(15). – С. 421 – 425.

145. **Особенности формирования** надслоевого пространства в сушилке с кипящим слоем инерта / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, Е. А. Черных, Е. Ю. Ловягина // Потенциал современной науки. – 2015. – № 2(10). – С. 36 – 39.

146. **Pilot unit for drying** distillery stillage in fluidized bed of inert particles / A. N. Pakhomov, S. G. Volostnykh, A. G. Eltsov, A. S. Shuvaev // The USA Journal of Applied Sciences. – 2015. – N 2. – P. 28 – 30.

147. **Influence of walls** of the device on frame of fluidized bed of inert particles / A. N. Pakhomov, R. Yu. Banin, E. A. Chernikh, E. Yu. Loviagina // Europäische Fachhochschule. – 2015. – N 3. – P. 67–68.

148. **Пахомов, А. Н.** Влияние возникающих в капле структур на кинетику сушки капли жидкой барды на подложке / А. Н. Пахомов, Ю. Н. Пахомова // Процессы самоорганизации в высыхающих каплях многокомпонентных жидкостей: эксперименты, теории, приложения : материалы II Междунар. конф. – Астрахань : Астраханский государственный университет, Издательский дом «Астраханский университет», 2012. – С. 107 – 112.

149. **Пахомова, Ю. В.** О возможности предотвращения аварийных ситуаций на предприятиях, перерабатывающих жидкую барду / Ю. В. Пахомова, А. Н. Пахомов // Безопасность в техносфере : сб. ст. ; науч. ред. В. М. Колодкин. – Ижевск : Изд-во Удмуртского университета, 2012. – С. 157 – 161.

150. **Пахомов, А. Н.** О возможности сушки жидкой барды / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды : сб. материалов Всерос. конф. – Чебоксары : Изд-во Чувашияского университета, 2012. – С. 122–123.

151. **Ильин, Е. А.** Профиль капли жидкости, высыхающей на твердой подложке / Е. А. Ильин, А. Н. Пахомов // Технические науки: современные проблемы и перспективы развития : материалы I Междунар. науч.-практ. конф. – Йошкар-Ола : Приволжский научно-исследовательский центр, Коллоквиум, 10 декабря 2012 г. – С. 169 – 171.

152. **Ильин, Е. А.** Изменение формы капли жидкости в процессе сушки на твердой диффузионно-непроницаемой подложке / Е. А. Ильин, А. Н. Пахомов // Тенденции и инновации современной науки : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар, 20 декабря 2012 г. – С. 67–68.

153. **Пахомов, А. Н.** Экспериментальные исследования кинетики сушки в аппарате с кипящим слоем инерта / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин // Технические науки – основа современной инновационной системы : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – Йошкар-Ола : Приволжский научно-исследовательский центр, Коллоквиум, 25 марта 2013 г. – С. 106 – 108.

154. **Пахомов, А. Н.** О возможности использования цветных таблиц для экспресс-анализа качества высушенной барды / А. Н. Пахомов, М. В. Петрухина // Теоретические и прикладные аспекты химической науки, товарной экспертизы и образования : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 75-летию со дня рождения В. Н. Николаева. – Чебоксары : ООО Издательский дом «Пегас», 25–26 апреля 2013 г. – С. 129 – 320.

155. **Кинетические** особенности сушки капель послеспиртовой барды на твердой подложке / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, И. Г. Елисеева, Е. А. Черных // Научная дискуссия: вопросы технических наук : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – М. : Изд-во «Международный центр науки и образования», 4 апреля 2013 г. – С. 107 – 111.

156. **Пахомов, А. Н.** Нагрев инертных частиц в сушилке с кипящим слоем / А. Н. Пахомов, А. В. Баландина, Л. А. Козлова // Техника и технология: новые перспективы развития : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – М. : Изд-во «Спутник +», 24 мая 2013 г. – С. 67 – 69.

157. **Характер потоков** жидкой фазы в испаряющейся капле / А. Н. Пахомов, А. В. Баландина, Л. А. Козлова, Е. А. Хатунцева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. – Воро-

неж : ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», 2013 г. – № 1(1). – С. 126 – 129.

158. **Формирование**, развитие и характер структур наблюдаемых при сушке на подложке капель жидких дисперсных продуктов. В 4 т. / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, И. Г. Елисеева, Е. А. Черных // Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет ; под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. Н. С. Попова. – 2013. – Т. 4. – С. 203 – 210.

159. **О применении средств** контроля в исследованиях сушильных процессов / А. Н. Пахомов, А. В. Баландина, Л. А. Козлова, М. В. Петрухина // Современные тенденции технических наук : материалы Междунар. науч. конф. – Уфа, май 2013 г. – С. 75–76.

160. **Пахомов, А. Н.** Пути снижения себестоимости сухой барды / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Безопасность и качество товаров : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. ; под ред. С. А. Богатырева – Саратов : ООО «Буква», 2013. – С. 59–60.

161. **Пахомов, А. Н.** Моделирование кинетики сушки капли на подложке. В 10 т. / А. Н. Пахомов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26 : сб. тр. XXVI Междунар. научн. конф. – Н. Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т, 2013. – Т. 7, секц. 14. – С. 21–22.

162. **Пахомов, А. Н.** Возможности применения сушилок с кипящим слоем инерта для утилизации послеспиртовой барды / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (22 – 24 мая 2013 г., г. Бийск), Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск : Изд-во Алтайского государственного технического университета, 2013. – С. 69 – 71.

163. **Экспериментальная установка** для исследования механизма и кинетики процесса сушки капель жидких дисперсных систем / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, И. Г. Елисеева, Е. А. Черных // Нестационарные, энерго- и ресурсосберегающие процессы и оборудование в химической, нано- и биотехнологии (НЭРПО-2013) : сб. тр. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. – М. : Московский государственный открытый университет им. В. С. Черномырдина, 23 – 26 сентября 2013 г. – С. 252 – 254.

164. **Экспериментальная установка** для изучения кинетики сушки тонких слоев жидких дисперсных продуктов на подложках / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, Е. А. Черных, Е. Ю. Ловягина // Совре-

менная наука: тенденции развития : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар, 20 мая 2014 г. – Т. 2. – С. 144 – 146.

165. **Пахомов, А. Н.** О влиянии исходного сырья на плотность послеспиртовой барды / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, Е. А. Черных // Тенденции и инновации современной науки : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар, 23 апреля 2014 г. – С. 54–55.

166. **Пахомов, А. Н.** Использование одиночных циклонов для улавливания сухого продукта после сушилки с кипящим слоем инерта / А. Н. Пахомов, В. А. Елизарова, Е. А. Хатунцева // Современные концепции научных исследований : VII Междунар. науч.-практ. конф. – Москва, 30–31 октября 2014 г. – № 7. – С. 112–113.

167. **Характер** разделения жидкой кукурузной послеспиртовой барды на центрифуге / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, Е. А. Черных, Е. Ю. Ловягина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж : Воронежская государственная лесотехническая академия (ВГЛТА), 2014 г. – № 6(11). – С. 202 – 205.

168. **Пахомов, А. Н.** Экспериментальная установка для изучения влияния РН суперпластификатора на воздухововлечение в бетон / А. Н. Пахомов, Е. А. Хатунцева, В. А. Елизарова // Научный поиск в современном мире : сб. материалов VI междунар. науч.-практ. конф. – Махачкала : ООО «Апробация», 30 мая 2014 г. – С. 42–43.

169. **Установка** для исследования кинетики загрязнений теплообменной аппаратуры / А. Н. Пахомов, Е. А. Хатунцева, Л. А. Козлова, А. В. Баландина // Техника и технологии: роль в развитии современного общества : материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар, 4 октября 2013 г. – С. 214 – 216.

170. **Пахомов, А. Н.** Способ утилизации жидкой послеспиртовой барды / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Малоотходные, ресурсосберегающие химические технологии и экологическая безопасность : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. – Sterlitamak : Уфимский государственный нефтяной технический университет, 21–22 ноября 2013 г. – С. 112–113.

171. **Фролов, А. А.** Электронные весы для записи кривой сушки / А. А. Фролов, А. Н. Пахомов // Труды ТГТУ. – 2000. – Вып. 6. – С. 193 – 196.

172. **Характер** кипящего слоя инерта вблизи газораспределительной решетки / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, Е. А. Черных, Е. Ю. Ловягина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 1(12). – С. 212 – 215.

173. **Формирование** и поведение кипящего слоя бинарного инерта / А. Н. Пахомов, С. Г. Волостных, А. Г. Ельцов, А. С. Шуваев // Актуальные проблемы современной науки: свежий взгляд и новые

подходы : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Москва, 10 мая 2015 г. – С. 143 – 146.

174. **Method** of determination of adhesion of the film dries distillery grains on the substrate / A. N. Pakhomov, R. Y. Banin, E. A. Chernikh et al. // Applied and Fundamental Studies : Proceedinge of the 5th International Academic Conference. – St. Louis, Missouri, 29–30 April 2014. – S. 71 – 73.

175. **Experimental** unit for studying the influence of additives on the properties of concrete / N. S. Sorokina, A.N. Pakhomov, R.U. Banin et al. // Theoretical & Applied Science. – 30 May 2014. – N 5(13). – S. 50 – 52.

176. **Formation** and behaviour of fluidized bed of inert particles / A. N. Pakhomov, S. G. Volostnykh, A. G. Eltsov, A. S. Shuvaev // European Applied Sciences: challenges and solutions : Papers of the 2nd International Scientific Conference. May 25, 2015, Stuttgart, Germany. – 175 p. – P. 119–120.

177. **The observed** heterogeneity of the fluidized bed / A. N. Pakhomov, R. Y. Banin, E. A. Chernikh, E. Y. Loviagina // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach : 4th International Scientific Conference. – San Francisco, California, USA. – Research articles. 2015. – V. 4. – P. 70 – 73.

178. **The effect of feed** slurry to the nature of the fluidized bed / A. N. Pakhomov, R. Y. Banin, E. A. Chernikh, E. Y. Loviagina // The Fifth International Conference on Eurasian scientific development. Proceedings of the Conference (June 1, 2015). «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. – Vienna, 2015. – 216 p. – P. 122–123.

179. **Experimental** approaches to the modelling of drying kinetics of dispersed products on substrates / A. N. Pakhomov, R. Y. Banin, E. A. Chernikh, E. Y. Loviagina // The Fourth International Conference on Eurasian scientific development. Proceedings of the Conference (March 1, 2015). «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. – Vienna, 2015. – 228 p.

180. **The influence** of the shape of the dryer to the nature of binary fluidized bed of inert / A. N. Pakhomov, R. Y. Banin, E. A. Chernikh, E. Y. Loviagina // Applied and Fundamental Studies, Proceedings of the 8th International Academic Conference: Publishing House Science and Innovation Center. St. Louis, Missouri, USA, 2015. – P. 121 – 123.

181. **Пахомов, А. Н.** Кинетика сушки дисперсий на твердых подложках : дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 ; защищена 16.03.2001. – Тамбов, 2000. – 225 с.

182. **Пахомов, А. Н.** Сушка капель жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова – М. : Изд-во «Перо», 2013. – 122 с.

183. **Пахомова, Ю. В.** Кинетика сушки капель жидких дисперсий на диффузионно-непроницаемых подложках : дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 ; защищена 23.12.2011 ; утв. 23.12.2012. – Тамбов, 2011. – 283 с.

184. **Гатапова, Н. Ц.** Особенности механизма и кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках / Н. Ц. Гатапова, А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе : сб. науч. ст. Первых Международ. Лыковских научных чтений, посвященных 105-летию академика А. В. Лыкова. – М., 2015. – С. 42 – 47.

185. **Пахомов, А. Н.** Кинетические особенности сушки капель жидких дисперсных продуктов на подложках / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе : сб. науч. ст. Первых Международ. Лыковских научных чтений, посвященных 105-летию академика А. В. Лыкова. – М., 2015. – С. 81 – 83.

186. **Исследование** характера кипящего слоя в сушилке с инертными телами / А. Н. Пахомов, С. Г. Скрипникова, А. О. Сироткин, Р. С. Загребнев // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 1. – URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3547

187. **Свидетельство** для государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618634 от 21.09.2012. Моделирование кинетики сушки жидких дисперсий на подложках / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, А. Н. Колиух.

188. **Свидетельство** для государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618631 от 21.09.2012. Расчет температурного поля твердого тела в потоке газа / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, А. Ю. Орлов.

189. **Свидетельство** для государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618941 от 20.08.2015. Моделирование профиля капли, высыхающей на горизонтальной подложке / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Н. Ц. Гатапова.

190. **Свидетельство** для государственной регистрации программы для ЭВМ № № 2015615160 от 12.05.2015. Моделирование кинетики испарения растворителей из тканевых материалов / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Н. Ц. Гатапова.

191. **Computational** Fluid Dynamics in Food Processing, edited by Da-Wen Sun // CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. – P. 776.
192. **Lauder, B. E.** The numerical computation of turbulence flows / B. E. Launder, D. B. Spalding // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2004. – N 3. – P. 269 – 289.
193. **Langrish, T. A. G.** The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modelling / T. A. G. Langrish, T. K. Kockel // Chemical Engineering Journal. – 2001. – N 84. – P. 69 – 74
194. **Fairchild, Mark D.** Color appearance models. Second Edition / Mark D. Fairchild. – USA : Munsell Color Science Laboratory. Rochester Institut of Technology, 2004.
195. **Chen, X. D.** Air drying of milk droplet under constant and time-dependent conditions / X. D. Chen, S. X. Q. Lin // AIChE Journal. – 2005. – N 51(6). – P. 1790 – 1799.
196. **Ferrari, G.** Drying kinetics for a single droplet of skim-milk / G. Ferrari, G. Meerdink, P. Walstra // Journal of Food Engineering. – 1989. – N 10. – P. 215 – 230.
197. **Straatsma, J.** Spray drying of food products: 1. Simulation model / J. Straatsma, G. van Houwelingen, A. E. Steenberg, P. de Jong // Journal of Food Engineering. – 1999. – N 42. – P. 67 – 72.
198. **Javierre-Pérez, E.** Literature Study: Numerical methods for solving Stefan problems, Report 03-16 / E. Javierre-Pérez. – Delft. : Delft University of Technology, 2003. – 94 c.
199. **Simulation** of agglomeration in spray drying installations / R. E. M. Verdurmen, P. Menn, J. Ritzert et al. // The Edecad project. Drying Technology. – 2004. – N 22(6). P. 1403 – 1461.
200. **Kockel, T. K.** An experimental study of the equilibrium for skim-milk powder at elevated temperatures / T. K. Kockel, S. Allen, C. Hennigs, T.A.G. Langrish // Journal of Food Engineering. – 2002. – N 51(6). – P. 291 – 297.
201. **Sommerfeld, M.** Validation of a stochastic Lagrangian modeling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence / M. Sommerfeld // International Journal of Multiphase Flow. – 2001. – N 27. – P. 1829 – 1858.
202. **Blei, S.** Lagrangian modeling of agglomeration during spray drying processes / S. Blei, M. Sommerfeld // 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. – Sorrento, 2003.
203. **Blei, S.** Computation of agglomeration for nonuniform dispersed phase properties – an extended stochastic collision model / S. Blei, M. Sommerfeld // 5th International Conference on Multiphase Flow. – Yokohama, 2004. – P. 1064.

204. **Huisman, L.** Control of glass melting processes based on reduced CFD models / L. Huisman // PhD thesis, Technical University, Eindhoven, The Netherlands, 2005.
205. **Astrid, P.** Reduction of process simulation models / P. Astrid // PhD thesis, Technical University, Eindhoven, The Netherlands, 2004.
206. **CFD simulation** of spray dryers / M. W. Woo, L. X. Huang, A. S. Mujumdar, W. R. W. Daud ; Ed. M. W. Woo, A. S. Mujumdar, W. R. W. Daud. – Singapore, 2010. – V. 1. – P. 1 – 36. – ISBN 978-981-08-6270-1.
207. **Yoon, S. S.** Lagrangian-based stochastic dilute spray modelling for drying applications / S. S. Yoon ; Ed. M. W. Woo, A. S. Mujumdar, W. R. W. Daud. – Singapore, 2010. – V. 1. – P. 77 – 112. – ISBN 978-981-08-6270-1.
208. **Langrish, T. A. G.** Spray drying and crystallization / T. A. G. Langrish ; Ed. M. W. Woo, A. S. Mujumdar, W. R. W. Daud. – Singapore, 2010. – V. 1. – P. 61 – 76. – ISBN 978-981-08-6270-1.
209. **Microstructure** characterization of milk powders and their relationship with rehydration properties / M. J. Perea-Flores, J. J. Chanona-Perez, E. Terres-Rojas et al. ; Ed. M. W. Woo, A. S. Mujumdar, W. R. W. Daud. – Singapore, 2010. – V. 1. – P. 197 – 218. – ISBN 978-981-08-6270-1.
210. **Spray** drying of food and herbal products / W. P. Oliveira, C. R. F. Souza, L. E. Kurozawa, K. L. Park ; Ed. M. W. Woo, A. S. Mujumdar, W. R. W. Daud. – Singapore, 2010. – V. 1. – P. 113 – 115. – ISBN 978-981-08-6270-1.
211. **Anandharamkrishnan**, Computational Fluid Dynamics Applications in Food Processing, Springer Briefs in Food, Health, and Nutrition, DOI: 10.1007/978-1-4614-7990-1_2, Chinnaswamy Anandharamkrishnan, 2013.
212. **Structure** and Dynamics of Liquid Crystalline Pattern Formation in Drying Droplets of DNA / I. I. Smalyukh, O. V. Zribi, J. C. Butler et al. // Physical review letters, 2 May. 2006. – PRL96,177801.
213. **A new model** for the drying of droplets containing suspended solids / C. S. Handscomb et al. // Chemical Engineering Science. – 2008. – DOI:10.1016/j.ces.2008.04.051.
214. **Julklang, W.** Analysis of Slurry Drying in a Spray Dryer / W. Julklang, B. Golman // International Journal of Engineering and Technology (IJET). – Dec 2013 – Jan 2014. – V. 5. – N. 6. – P. 5178 – 5189. – DOI:10.1007/s11671-010-9793-9.
215. **Handbook** of Industrial Drying / Fourth Edition Edited by Arun S. Mujumdar // CRC Press Taylor & Francis Group. – 2015. – P. 1334.
216. **Kudra, T.** Advanced Drying Technologies / T. Kudra, A. S. Mujumdar // Marcel Dekker. – New York, 2001. – P. 457.

217. **Menshutina, N. V.** Computer aided drying technologies / N. V. Menshutina, T. Kudra // *Drying Technology*. – 2001. – N 19(8). – P. 1825 – 1849.

218. **Lima, A. G. B.** Theoretical analysis of the diffusion process inside prolate spheroidal solids / A. G. B. Lima, S. A. Nebra, M. R. Queiroz // *Drying Technology*. – 2001. – N 18(1–2). – P. 21 – 48.

219. **Perre, P.** *Mathematical Modeling and Numerical Techniques* / P. Perre, I. Turner (eds.) // *Drying Technology*. – New York : Marcel Dekker, 2000.

220. **Sablani, S.** Moisture diffusivity in foods – An overview / S. Sablani, S. Rahman, N. Al-Habsi // *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*, Mujumdar, A. S. (ed.), Science Publishers, Enfield, NH, 2000.

221. **Saravacos, G. D.** *Transport Properties of Foods* / G. D. Saravacos, Z. B. Maroulis. – New York : Marcel Dekker, 2001.

222. **Maroulis, Z. B.** Modeling, simulation and design of drying processes / Z. B. Maroulis, G. D. Saravacos // *Keynote Lecture at the 13th International Drying Symposium*. – IDS 2002, Beijing, China.

223. **Maroulis, Z. B.** *Food Process Design* / Z. B. Maroulis, G. D. Saravacos. – New York : Marcel Dekker, 2003.

224. **Mujumdar, A. S.** Classification and selection of industrial dryers / A. S. Mujumdar ; In: S. Devahastin, ed. // *Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying: Principles, Equipment and New Developments*. – Brossard, Quebec, Canada : Exergex Corporation, 2000. – P. 23 – 36.

225. **Vega, R. E.** Dimensionless correlation for the heat transfer coefficient in a batch-indirect rotary drier / R. E. Vega, P. I. Alvarez, E. R. Canales // *Drying Technology*. – 2000. – N 18. – P. 2351 – 2367.

226. **Caldwell, J.** Numerical methods for one-dimensional Stefan problems / J. Caldwell, Y. Y. Kwan // *Commun. Numer. Meth. Engng.* – 2004. – N 20. – P. 535 – 545.

227. **Jangam, S. V.** Design of an efficient gas distribution system for a fluidized bed dryer / S. V. Jangam, A. S. Mujumdar, B. N. Thorat // *Drying Technology*. – 2009. – N 27. – P. 1217 – 1228.

228. **Wormsbecker, M.** Distributor induced hydrodynamics in a conical fluidized bed dryer / M. Wormsbecker, T. Pugsley // *Drying Technology*. – 2009. – N 27. – P. 797 – 804.

229. **Karri, S. B. R.** Gas distributor and plenum design in fluidized beds, in *Handbook of Fluidization and Fluid Systems* / S. B. R. Karri, J. Werther ; W. C. Yang, Ed. – New York : Marcel Dekker, 2003. – Chap. 6.

230. **Sreenivasan, B.** Hydrodynamics of a swirling fluidised bed / B. Sreenivasan, V. R. Raghavan // *Chem. Eng. Process.* – 2002. – N 41. – P. 99 – 106.

231. **Ozbey, M.** Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains / M. Ozbey, M. S. Soylemez // *Energy Convers. Manag.* – 2005. – N 46. – P. 1495 – 1512.
232. **Mujumdar, A. S.** Applications for fluidized bed drying, in *Handbook of Fluidization and Fluid Systems* / A. S. Mujumdar, S. Devahastin ; W. C. Yang, Ed. – New York : Marcel Dekker, 2003. – Chap. 18.
233. **Ronsse, F.** Numerical spray model of the fluidized bed coating process / F. Ronsse, J. G. Pieters, K. Dewettinck // *Drying Technology.* – 2007. – N 25. – P. 1491 – 1514.
234. **Desai, K. G. H.** Recent developments in microencapsulation of food ingredients / K. G. H. Desai, H. J. Park // *Drying Technology.* – 2005. – N 23(7). – P. 1361 – 1394.
235. **Guignon, B.** Fluid bed encapsulation of particles: Principles and practice / B. Guignon, A. Duquenoy, E. D. Dumoulin // *Drying Technology.* – 2002. – N 20(2). – P. 419 – 447.
236. **Grunewald, G.** Fluidized bed spray granulation: Nucleation studies with steady-state experiments / G. Grunewald, B. Westhoff, M. Kind // *Drying Technology.* – 2010. – N 28. – P. 349 – 360.
237. **Air-suspension** fluidized-bed microencapsulation of probiotics / D. Semyonov, O. Ramon, A. Kovacs, L. Friedlander, E. Shimoni // *Drying Technology.* – 2012. – N 30. – P. 1918 – 1930.
238. **Chen, J. C.** Heat transfer, in *Handbook of Fluidization and Fluid Systems* / J. C. Chen ; W. C. Yang, Ed. – New York : Marcel Dekker, 2003. – Chap. 10.
239. **Influence** of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying / W. Senadeera, B. R. Bhandari, G. Young, B. Wijesinghe // *J. Food Eng.* – 2003. – N 58. – P. 277 – 283.
240. **Baker, C. G. J.** An evaluation of factors influencing the energy-efficient operation of well-mixed fluidized bed dryers / C. G. J. Baker, H. A. H. Al-Adwani // *Drying Technology.* – 2007. – N 25. – P. 311 – 318.
241. **Simulation** of plug flow fluidized bed dryers / C. G. J. Baker, A. R. Khan, Y. I. Ali, K. Damyar // *Chem. Eng. Process.* – 2006. – N 45. – P. 641 – 651.
242. **Daud, W. R. W.** A cross-flow model for continuous plug flow fluidized-bed cross-flow dryers / W. R. W. Daud // *Drying Technology.* – 2007. – N 25. – P. 1229 – 1235.
243. **Baker, C. G. J.** An improved model of plug-flow fluidized bed dryers with an emphasis on energy conservation / C. G. J. Baker, H. M. S. Lababidi // *Drying Technology.* – 2010. – N 28. – P. 730 – 741.
244. **Yazdanpanah, N.** Crystallization and drying of milk powder in a multiple-stage fluidized bed dryer / N. Yazdanpanah, T. A. G. Langrish // *Drying Technol.* – 2011. – N 29. – P. 1046 – 1057.

245. **Mujumdar, A. S.** Filter dryers in process industries / A. S. Mujumdar, C. L. Law // *Chemical Industry Digest*. – April 2006. – P. 34 – 42.
246. **Study** of the performance of the rotary dryer with fluidization / M. H. Lisboa, M. C. Alves, D. S. Vitorino et al. // *Proceedings of the 14th International Drying Symposium* ; M. A. Silva et al., Eds. – Sao Paulo, Brazil, 2004. – P. 1668 – 1675.
247. **Investigation** of flow behaviors and bubble characteristics of a pulse fluidized bed via CFD modeling / Z. Li, W. Su, Z. Wu et al. // *Drying Technology*. – 2010. – N 28. – P. 78 – 93.
248. **Kudra, T.** *Advanced Drying Technologies* / T. Kudra, A. S. Mujumdar. – New York : Marcel Dekker, 2009. – Chap. 6.
249. **Drying** of pulp and paper sludge in a pulsed fluid bed dryer / T. Kudra, Z. Gawrzynski, R. Glaser et al. // *Drying Technology*. – 2002. – N 20(4–5). – P. 917 – 933.
250. **Nitz, M.** Drying of beans in a pulsed fluid bed dryer: Drying kinetics, fluid-dynamic study and comparisons with conventional fluidization / M. Nitz, O. P. Taranto // *J. Food Eng.* – 2007. – N 80. – P. 249 – 256.
251. **Ambrosio, M. C. B.** The drying of solids in a modified fluidized bed / M. C. B. Ambrosio, O. P. Taranto // *Braz. J. Chem. Eng.* – 2002. – N 19(3). – P. 355 – 358.
252. **Reyes, A.** Drying of potato slices in a pulsed fluidized bed / A. Reyes, P. Moyano, J. Paz // *Drying Technology*. – 2007. – N 25. – P. 581 – 590.
253. **Reyes, A.** Drying sawdust in a pulsed fluidized bed / A. Reyes, R. Vega, G. Garcia // *Drying Technology*. – 2008. – N 26. – P. 476 – 486.
254. **Reyes, A.** Drying of turnip seeds with microwaves in fixed and pulsed fluidized beds / A. Reyes, C. Campos, R. Vega // *Drying Technology*. – 2006. – N 24. – P. 1469 – 1480.
255. **Mujumdar, A. S.** Fluidized bed drying technology, in *Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying* / A. S. Mujumdar, S. Devahastin ; S. Devahastin, Ed. – Exergex Corporation, Montreal, Quebec, Canada, 2000. – Chap. 5.
256. **Daleffe, R. V.** Drying of pastes in vibro-fluidized beds: Effects of the amplitude and frequency of vibration / R.V. Daleffe, M. C. Ferreira, J. T. Freire // *Drying Technology*. – 2005. – N 23. – P. 1765 – 1781.
257. **Cruz, M. A. A.** Final drying of whole milk powder in vibrated-fluidized beds / M. A. A. Cruz, M. L. Passos, W. R. Ferreira // *Drying Technology*. – 2005. – N 23. – P. 2021 – 2037.
258. **Reyes, A.** Drying and heat transfer characteristics for a novel fluidized bed dryer / A. Reyes, M. Eckholt, P. I. Alvarez // *Drying Technology*. – 2004. – N 22(8). – P. 1869 – 1895.

259. **Mechanically** Agitated fluidized bed drying of cohesive particles at low air velocity / R. G. Bait, S. B. Pawar, A. N. Banerjee et al. // *Drying Technology*. – 2011. – N 29. – P. 808 – 818.

260. **Drying** kinetics of oil palm frond particles in an agitated fluidized bed dryer / I. Puspasari, M. Z. M. Talib, W. R. W. Daud, S. M. Tasirin // *Drying Technology*. – 2012. – N 30. – P. 619 – 630.

261. **Adamic, J.** Drying of waste sludges in a fluidized bed dryer with a mixer / J. Adamic // *Drying Technology*. – 2002. – N 20(4–5). – P. 839 – 853.

262. **Costa, E. F.** Simulation of drying suspensions in spout-fluid beds of inert particles / E. F. Costa, M. Cardoso, M. L. Passos // *Drying Technology*. – 2001. – N 19(8). – P. 1975 – 2001.

263. **Grbavcic, Z. B.** Drying of slurries in fluidized bed of inert particles / Z. B. Grbavcic, Z. Lj. Arsenijevic, R. V. Garic-Grulovic // *Drying Technology*. – 2004. – N 22(8). – P. 1793 – 1812.

264. **Drying** characteristics of porous materials in a fluidized bed under reduced pressure / Y. Tatemoto, Y. Mawatari, K. Sugita et al. // *Drying Technology*. – 2005. – N 23. – P. 1257 – 1272.

265. **Drying** of Pepper seed particles in a superheated steam fluidized bed operating at reduced pressure / B. Kozanoglu, A. Flores, J. A. Guerrero-Beltran, J. WeltiChanes // *Drying Technology*. – 2012. – N 30. – P. 884 – 890.

266. **Microdroplet** Engineering for Microbioassay and Synthesis of Functional Structured Porous Particles ; Under the direction of Dr. Orlin D. Velev / by Vinayak Rastogi A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Chemical Engineering Raleigh, North Carolina, 2010.

267. **Mezhericher, M.** Modelling the morphological evolution of nanosuspension droplet in constant-rate drying stage / M. Mezhericher, A. Levy, I. Borde // *Chemical Engineering Science*. – 2011. – N 66. – P. 884 – 896.

268. **Continuous** species transport and population balance models for first drying stage of nanosuspension droplets / M. Mezhericher, M. Naumann, M. Peglow et al. // *Chemical Engineering Journal*. – 2012. – N 210. – P. 120 – 135.

269. **Seydel, P.** Modeling particle formation at spray drying using population balances / P. Seydel, J. Blomer, J. Bertling // *Drying Technology*. – 2006. – N 24. – P. 137 – 146.

270. **Handscorn, C. S.** A new model for the drying of droplets containing suspended solids after shell formation / C. S. Handscorn, M. Kraft, A. E. Bayly // *Chemical Engineering Science*. – 2009. – N 64. – P. 228 – 246.

271. **Population** balance model for drying of droplets containing aggregating nanoparticles / A. Buck, M. Peglow, M. Naumann, E. Tsotsas // *AIChE Journal*. – 2012. – N 58. – P. 3318 – 3328.

272. **Chen, X. D.** The basics of a reaction engineering approach to modeling air-drying of small droplets or thin-layer materials / X. D. Chen // *Drying Technology*. – 2008. – N 26. – P. 627 – 639.

273. **Patel, K. C.** Prediction of spray-dried product quality using two simple drying kinetics models / K. C. Patel, X. D. Chen // *Journal of Food Process Engineering*. – 2005. – N 28. – P. 567 – 594.

274. **Multiphase** Flows with Droplets and Particles / C. T. Crowe, J. D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, Y. Tsuji. – 2nd ed. – CRC Press, Boca Raton, FL, 2011.

275. **Peng Xu.** Mujumdar & Boming Yu Fractal Theory on Drying : A Review / Peng Xu, S. Arun // *Drying Technology*. – May 2008. – V. 26, Is. 6. – P. 640 – 650.

276. **Fractal** Pore Network Simulation on the Drying of Porous Media / Zhifeng Xiao, Yang Deyong, Yuejin Yuan et al. // *Drying Technology*. – May 2008. – V. 26, Is. 6. – P. 651 – 665.

277. **Fractal** Phase Distribution and Drying: Impact on Two-Phase Zone Scaling and Drying Time Scale Dependence / Marc Prat, Stéphanie Veran-Tissoires, Nicole Vorhauer et al. // *Drying Technology*. – September 2012. – V. 30, Is. 11–12. – P. 1129 – 1135.

278. **Vacuum** Drying Kinetics of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and the Effect of Process Conditions on Fractal Dimension and Rehydration Capacity / Felipe Richter Reis, Marcelo Kaminski Lenzi, Graciela Inês Bolzón de Muñiz et al. // *Drying Technology*. – January 2012. – V. 30, Is. 1. – P. 13 – 19.

279. **Milad Fathi.** Application of Fractal Theory for Prediction of Shrinkage of Dried Kiwifruit Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm / Milad Fathi, Mohebbat Mohebbi, Seyed M. A. Razavi // *Drying Technology*. – June 2011. – V. 29, Is. 8. – P. 918 – 925.

280. **Kerdpi boon, Soraya.** Fractal Characterization of Some Physical Properties of a Food Product under Various Drying Conditions / Soraya Kerdpi boon, Sakamon Devahastin // *Drying Technology*. – February 2007. – V. 25, Is. 1. – P. 135 – 146.

281. **Yiotis, A. G.** Fractal Characteristics and Scaling of the Drying Front in Porous Media: A Pore Network Study / A. G. Yiotis, I. N. Tsimpanogiannis, A. K. Stubos // *Drying Technology*. – July 2010. – V. 28, Is. 8. – P. 981 – 990.

282. **Fractal Modeling** and Simulation of the Developing Process of Stress Cracks in Corn Kernel / Wenxue Zhu, Tiejou Dong, Chongwen Cao, Dong Li // *Drying Technology*. – December 2004. – V. 22, Is. 1–2. – P. 59 – 69.

283. **Junhong, Yang.** Correlation of Volume Fractal Dimension Inside Matrix of Plant Materials and Rehydration Behavior / Junhong Yang, Heng Zhang, Qianqian Di, Shaohui Yang // *Drying Technology*. – December 2012. – V. 30, Is. 15. – P. 1688 – 1697.

284. **Kerdpi boon, Soraya.** Thesis Summary: Use of Fractal Analysis to Evaluate Physical Changes of Foods during Drying / Soraya Kerdpi boon // *Drying Technology*. – June 2007. – V. 25, Is. 6. – P. 1131.

285. **Fang Zhao.** Numerical Study on Moisture Transfer in Ultrasound-Assisted Convective Drying Process of Sludge / Fang Zhao, Zhenqian Chen // *Drying Technology*. – September 2011. – V. 29, Is. 12. – P. 1404 – 1415.

286. **Probing** Heterogeneous Structure of Aggregates / Zeng Yang, Duu-Jong Lee, Arun S. Mujumdar et al. // *Drying Technology*. – July 2008. – V. 26, Issue 8. – P. 1018 – 1023.

287. **Guan, J.** Impact of Aggregate Size and Structure on Biosolids Settleability / J. Guan, T. D. Waite // *Drying Technology*. – October 2006. – V. 24, Is. 10. – P. 1209 – 1215.

288. **Observation** of Taurine Crystallization via Single Droplet Drying / Ruohui Lin, Meng Wai Woo, Nan Fu et al. // *Drying Technology*. – October 2013. – V. 31, Is. 13–14. – P. 1553 – 1561.

289. **Langrish, T. A. G.** An Investigation and Quantitative Assessment of Particle Shape in Milk Powders from a Laboratory-Scale Spray Dryer / T. A. G. Langrish, N. Marquez, K. Kota // *Drying Technology*. – December 2006. – V. 24, Is. 12. – P. 1619 – 1630.

290. **Tao, T.** Structure of Crack in Thermally Dried Sludge Cake / T. Tao, X. F. Peng, D. J. Lee // *Drying Technology*. – July 2005. – V. 23, Is. 7. – P. 1555 – 1568.

291. **Shrinkage** and Deformation of Agave atrovirens Karw Tissue during Convective Drying: Influence of Structural Arrangements / Carolina Gumeta-Chávez, José Jorge Chanona-Pérez, Jorge Alberto Mendoza-Pérez et al. // *Drying Technology*. – April 2011. – V. 29, Is. 6. – P. 612 – 623.

292. **Floc** Strength Evaluation at Alternative Shearing with Presence of Natural Organic Matters / Shung-Shuan Sung, Sheau-Pyng Ju, Chien Hsu et al. // *Drying Technology*. – July 2008. – V. 26, Is. 8. – P. 996 – 1001.

293. **Turner, M. Ilic.** Modelling Non-Fickian Behavior in the Cell Walls of Wood Using a Fractional-In-Space Diffusion Equation / M. Ilic Turner, P. Perré // *Drying Technology*. – December 2011. – V. 29, Is. 16. – P. 1932 – 1940.

294. **Vorhauer, N.** Empirical Macroscopic Model for Drying of Porous Media Based on Pore Networks and Scaling Theory / N. Vorhauer, T. Metzger, E. Tsotsas // *Drying Technology*. – July 2010. – V. 28, Is. 8. – P. 991 – 1000.

295. **Kyuya Nakagawa.** Characterization of Freeze-Dried Core – Shell Nanoparticles Prepared via Gelatin – Acacia Complex Coacervation: A Study on Particle Formation upon Freezing / Kyuya Nakagawa // *Drying Technology.* – October 2013. – V. 31, Is. 13–14. – P. 1466 – 1476.

296. **Sedimentation** of Permeable Floc / Z. Yang, X. F. Peng, C. P. Chu et al. // *Drying Technology.* – October 2006. – V. 24, Is. 10. – P. 1277 – 1282.

297. **Teeraya Jarunglumlert.** Spray Drying of Casein Aggregates Loaded with β -Carotene: Influences of Acidic Conditions and Storage Time on Surface Structure and Encapsulation Efficiencies / Teeraya Jarunglumlert, Kyuya Nakagawa // *Drying Technology.* – October 2013. – V. 31, Is. 13–14. – P. 1459 – 1465.

298. **Coagulation** of Particles Through Rapid Mixing / Wen-Yan Sheng, X. F. Peng, D. J. Lee, Ay Su // *Drying Technology.* – October 2006. – V. 24, Is. 10. – P. 1271 – 1276.

299. **Željko Gorišek.** Sorption and Drying Characteristics of Xylite / Željko Gorišek, Aleš Straže // *Drying Technology.* – July 2014. – V. 32, Is. 10. – P. 1256 – 1264.

300. **Franco, Pedreschi.** Frying of Potatoes: Physical, Chemical, and Microstructural Changes / Franco Pedreschi // *Drying Technology.* – June 2012. – V. 30, Is. 7. – P. 707 – 725.

301. **Mujumdar, Arun S.** Thermal Drying Technologies–Cost-Effective Innovation Aided by Mathematical Modeling Approach / Arun S. Mujumdar, Wu Zhonghua // *Drying Technology.* – December 2007. – V. 26, Is. 1. – P. 145 – 153.

302. **Junhong, Yang.** Application of Pore Size Analyzers in Study of Chinese Angelica Slices Drying / Junhong Yang, Qianqian Di, Qiang Jiang, Jun Zhao // *Drying Technology.* – March 2010. – V. 28, Is. 2. – P. 214 – 221.

303. **A Moisture** Transmembrane Transfer Model for Pore Network Simulation of Plant Materials Drying / Xiaoli Huang, Tingting Qi, Zhenhua Wang et al. // *Drying Technology.* – December 2012. – V. 30, Is. 15. – P. 1742 – 1749.

304. **Pore Network** Drying Model for Particle Aggregates: Assessment by X-Ray Microtomography / Yujing Wang, Abdolreza Kharaghani, Thomas Metzger, Evangelos Tsotsas // *Drying Technology.* – December 2012. – V. 30, Is. 15. – P. 1800 – 1809.

305. **Jarl-Gunnar, Salin.** Drying of Liquid Water in Wood as Influenced by the Capillary Fiber Network / Jarl-Gunnar Salin // *Drying Technology.* – April 2008. – V. 26, Is. 5. – P. 560 – 567.

306. **Mathematical** Modeling of Drying Processes Using Methods of the Nonequilibrium Thermodynamics and Percolation Theory / Cs. Mészáros, Á. Bálint, I. Kirschner et al. // *Drying Technology*. – August 2007. – V. 25, Is. 7–8. – P. 1297 – 1304.

307. **Compressive** Strength and Capillary Pressure: Competing Properties of Particulate Suspensions that Determine the Onset of Desaturation / Anthony D. Stickland, Hui-En Teo, George V. Franks, Peter J. Scales // *Drying Technology*. – October 2014. – V. 32, Is. 13. – P. 1614 – 1620.

308. **Liming Che**. Convective drying kinetics of single droplets of aqueous glucose / Liming Che, Dong Li, Xiao Dong Chen // 7th Asia-Pacific Drying Conference (ADC 2011), Tianjin, China, 18 – 20 September 2011. – Tianjin, 2011 – 1. General statements. – Vol. B. – P. 5 – 28.

309. **Farkas, I.** Use of Artificial Intelligence for the Modelling of Drying Processes / I. Farkas // *Drying Technology*. – May 2013. – V. 31, Is. 7. – P. 848 – 855.

310. **Hosseinpour, Soleiman**. Application of Image Processing to Analyze Shrinkage and Shape Changes of Shrimp Batch during Drying / Soleiman Hosseinpour, Shahin Rafiee, Seyed Saeid Mohtasebi // *Drying Technology*. – September 2011. – V. 29, Is. 12. – P. 1416 – 1438.

311. **Vaxelaire, J.** Conditioning for Municipal Sludge Dewatering. From Filtration Compression Cell Tests to Belt Press / J. Vaxelaire, J. Olivier // *Drying Technology*. – October 2006. – V. 24, Is. 10. – P. 1225 – 1233.

312. **A. Segura, Luis**. Modeling at Pore-Scale Isothermal Drying of Porous Materials: Liquid and Vapor Diffusivity / Luis A. Segura // *Drying Technology*. – October 2007. – V. 25, Is. 10. – P. 1677 – 1686.

313. **A Moisture** Transfer Model for Isothermal Drying of Plant Cellular Materials Based on the Pore Network Approach / Bo Xiao, Jian Chang, Xiaoli Huang, Xiangdong Liu // *Drying Technology*. – July 2014. – V. 32, Is. 9. – P. 1071 – 1081.

314. **Tsotsas, E.** Influence of Drying Kinetics on Particle Formation: A Personal Perspective / E. Tsotsas // *Drying Technology*. – September 2012. – V. 30, Is. 11–12. – P. 1167 – 1175.

315. **Wei Wang**. A Model for Drying of Porous Materials: From Generality to Specific Applications / Wei Wang, Hongxin Ma, Guohua Chen // *Drying Technology*. – October 2011. – V. 29, Is. 13. – P. 1542 – 1555.

316. **Artificial** Neural Network Modeling of the Deposition Rate of Lactose Powder in Spray Dryers / Samaneh Keshani, Wan Ramli Wan Daud, Meng Wai Woo et al. // *Drying Technology*. – March 2012. – V. 30, Is. 4. – P. 386 – 397.

317. **Gavriil, G.** Coutelieris Mathematical Simulation of Mass Transport in Porous Media: An Innovative Method to Match Geometrical and Transport Parameters for Scale Transition / G. Gavriil, E. Vakouftsi, A. Frank // *Drying Technology*. – May 2014. – V. 32, Is. 7. – P. 781 – 792.

318. **Strumillo, C.** Perspectives on Developments in Drying / Czesław Strumillo // *Drying Technology*. – September 2006. – V. 24, Is. 9. – P. 1059 – 1068.

Научное издание

ПАХОМОВ Андрей Николаевич
ГАТАПОВА Наталья Цибиковна
ПАХОМОВА Юлия Владимировна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ
ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ
НА ПОДЛОЖКАХ**

Монография

Редактор Л. В. Комбарова
Инженер по компьютерному макетированию М. Н. Рыжкова

ISBN 978-5-8265-1672-0



Подписано в печать 30.12.2016.
Формат 60 × 84 / 16. 9,3 усл. печ. л.
Тираж 500 экз. Заказ № 520

Издательско-полиграфический центр
ФГБОУ ВО «ТГТУ»

392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08;
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru