

ДМИТРИЕВ Вячеслав Михайлович

**КИНЕТИКА И АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА
КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ И ПЛЕНОЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕ-
РИАЛОВ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тамбов 2003

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедре "Процессы и аппараты химической технологии"

Научный консультант Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Рудобашта Станислав Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Данилов Олег Леонидович

доктор технических наук, профессор
Ефремов Герман Иванович

доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Шувалов Анатолий Михайлович

Ведущая организация ФГУП "Тамбовский научно-исследовательский
химический институт"

Защита диссертации состоится " ____ " октября 2003 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета по присуждению ученой степени доктора технических наук Д 212.260.02 в Тамбовском государственном техническом университете по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1, ауд. 60.

Отзыв на автореферат (в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью) просим направлять по адресу: 392620, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.260.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.М. Нечаев

Подписано к печати 11.06.2003

Формат 60 × 84 / 16. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Объем: 1,86 усл. печ. л.; 2,0 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 410

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обширный ряд современных отраслей промышленности применяет разнообразные процессы тепло- и массопереноса, оптимальное проведение которых играет существенную роль в обеспечении качества готовой продукции. Составной частью многих производств является обработка дисперсных сред, характеризующаяся значительной энергоемкостью, что отражается на формировании себестоимости выпускаемых изделий. Интенсивное внедрение систем автоматизированного проектирования, позволяющих проанализировать множество вариантов проведения процессов ТМП и выбрать оптимальное решение, обусловлено, в первую очередь, широким использованием математических моделей ТМП в совокупности с базами данных по теплофизическим и диффузионным характеристикам перерабатываемых дисперсных сред.

В этой области широко известны труды А.В. Лыкова, А.Н. Плановского, П.Г. Романкова, В.В. Кафарова, М.В. Лыкова, В.Ф. Фролова, С.П. Рудобашты, В.И. Коновалова, Б.С. Сажина, Э.М. Карташова, В.И. Муштаева, И.Н. Таганова, В. Роджерса, Э. Бэра, Э. Вандеберга, Г. Шнелла и других ученых.

Одними из наиболее распространенных дисперсных материалов являются гранулированные полимеры и полимерные материалы на их основе. Интенсивное развитие производства полимеров вызывает необходимость глубокого экспериментального и теоретического изучения одного из базовых процессов при синтезе, переработке и эксплуатации ПМ – процесса диффузии низкомолекулярных соединений при набухании и растворении полимеров, структурообразовании, пленкообразовании и сушки, паро- и газопроницаемости полимерных мембран. Сорбционные и диффузионные характеристики ПМ существенно зависят от параметров среды и концентрации распределенного компонента. Кроме того, введение наполнителей, красителей, пластификаторов, стабилизаторов и других добавок может значительно изменить качественно и количественно сорбционно-диффузионные свойства ПМ. Способ и технология получения гранулированных ПМ дополнительно отражаются на их сорбционно-диффузионных свойствах. Отсутствие учета этих зависимостей при расчетах и проведении процессов ТМП может привести не только к существенной количественной ошибке, но и к резкому снижению качества продукции из полимерных материалов.

Несмотря на значительное количество моделей диффузионных процессов теоретическое определение характеристик процесса ТМП в дисперсных материалах в настоящее время весьма затруднительно.

Современное состояние методов кинетического расчета непрерывной конвективной сушки дисперсных материалов характеризуется постепенным отходом от различных эмпирических методов и все более широким внедрением теоретических и смешанных методов с получением дополнительной экспериментальной информации на основе физического моделирования процесса.

Проблемой, сдерживающей разработку теоретических методов расчета, оптимизации и проектирования сушильных аппаратов для гранулированных ПМ, является недостаточность информации о сорбционных и диффузионных свойствах материалов, влиянии дисперсии по размерам частиц и времени пребывания в аппарате на точность кинетического расчета.

В мировой практике большое внимание уделяется вопросу герметичного затаривания в полимерные чехлы химических, медицинских, пищевых и других продуктов, целого ряда точных приборов, машин и аппаратов для обеспечения качественного сохранения и транспортировки в условиях повышенной влажности окружающей среды.

Традиционные способы упаковки в герметичные пленочные чехлы, при которых влагосодержание внутренней среды изменяется от незначительного начального до предельно допустимого оказываются совершенно неприемлемыми для влагочувствительных материалов и изделий с узким рабочим интервалом относительной влажности окружающей среды (фотоматериалы, магнитные ленты, радиоэлектронная аппаратура, точные приборы).

Основными направлениями при решении данных проблем являются:

- комплексное исследование гранулированных ПМ как объектов сушки с анализом элементарных и осложняющих явлений, характеризующих реальный процесс, и разработка математического описания тепломассопереноса;

- изучение явлений тепломассопереноса при глубокой конвективной сушке гранулированных ПМ на модельных экспериментальных установках с математическим описанием кинетических закономерностей;
- изучение реального процесса глубокой конвективной сушки с выделением лимитирующих факторов, установление связи между ними и математическое описание комплексного процесса массопереноса;
- решение конструкторских задач аппаратурного оформления процесса глубокой сушки гранулированных ПМ;
- исследование кинетических особенностей процесса паропроницания в герметичных пленочных упаковках и разработка новых способов упаковки.

Целью работы являются повышение производительности и качественных показателей процесса конвективной сушки гранулированных и пленочных полимерных материалов, научное обоснование и разработка инженерных методов кинетического расчета и проектирования сушильных аппаратов для конвективной сушки полимерных материалов с большим внутридиффузионным сопротивлением, разработка новых конструкций полимерных упаковок и методик кинетического расчета диффузионного проницания полимерных упаковок.

Для достижения указанной цели поставлен и решен комплекс задач:

- создание лабораторного оборудования для исследования диффузионных характеристик гранулированных и пленочных ПМ со значительным внутридиффузионным сопротивлением в широком диапазоне температур при малых концентрациях распределяемого компонента;
- экспериментальное и теоретическое исследование структурно-сорбционных и диффузионных свойств гранулированных и пленочных ПМ с большой величиной внутридиффузионного сопротивления; определение температурно-концент-рационных зависимостей эффективного коэффициента диффузии воды в ПМ, имеющих широкое промышленное применение; получение обобщенных уравнений для расчета диффузионных характеристик ПМ по их структурным свойствам;
- разработка автоматизированной установки и методики для определения эффективного коэффициента диффузии, учитывающей полидисперсность реальных гранулированных материалов;
- анализ влияния неоднородности частиц высушиваемого материала по их дисперсному составу и времени пребывания в аппарате на точность кинетического расчета процесса глубокой конвективной сушки;
- экспериментальные исследования и получение аналитических решений кинетики конвективного нагрева и глубокой сушки плотного кольцевого слоя гранулированных ПМ;
- разработка новых конструкций промышленных аппаратов с кольцевым поперечно продуваемым плотным слоем материала для глубокой конвективной сушки гранулированных ПМ;
- разработка методик проектного и технологического расчета процесса глубокой конвективной сушки гранулированных ПМ в сушильных аппаратах шахтного типа с поперечно продуваемым кольцевым слоем материала;
- разработка конструктивных решений промышленных аппаратов с закрученным взвешенным слоем материала для сушки от поверхностной влаги;
- исследование особенностей процесса массопереноса в герметичных пленочных упаковках для хранения гигроскопических материалов и машиностроительной продукции;
- разработки нового способа и конструкции пленочной упаковки, методики расчета времени хранения продукции в герметичной полимерной упаковке в условиях влажного и сухого климата при жестких требованиях к влажности внутренней среды.

Научная новизна. Создана методология кинетического расчета процесса глубокой сушки гранулированных полимерных материалов и проектирования сушильных аппаратов на базе основных положений теории массопереноса и комплексных теоретических и экспериментальных исследований процесса диффузии влаги в полимерах. Разработаны новые методы и установки для определения диффузионных характеристик влажных материалов, обобщены данные по эффективным коэффициентам диффузии влаги, получены уравнения для расчета диффузионных характеристик полимерных материалов. Разработаны новые методики кинетического расчета диффузионного проницания пленочных полимерных материалов.

В том числе:

- разработан новый зональный метод определения диффузионных характеристик полидисперсных зернистых материалов;
- выполнен анализ влияния неоднородности частиц гранулированных материалов по размерам и времени пребывания в аппарате на точность кинетического расчета процесса глубокой конвективной

сушки в шахтных сушильных аппаратах и обоснована необходимость учета этих факторов в аналитических методиках кинетического расчета;

– разработаны новые методики проектного и технологического расчетов процесса глубокой конвективной сушки гранулированных полимерных материалов в шахтных сушильных аппаратах с кольцевым продуваемым слоем материала;

– разработаны новый метод упаковки и методики кинетического расчета диффузионного проникновения полимерных пленочных упаковок в условиях влажного и сухого климата при заданных ограничениях влажности среды хранения.

Практическая значимость и реализация результатов работы. На основе теоретических, экспериментальных и опытно-промышленных исследований процесса массопереноса в полимерных материалах созданы новые конструкции сушильных аппаратов для глубокой конвективной сушки промышленных гранулированных ПМ с большим внутридиффузионным сопротивлением, обеспечивающие сокращение времени сушки в 4–5 раз по сравнению с существующим оборудованием. Разработаны методики проектного и технологического расчетов сушильных аппаратов шахтного типа с кольцевым слоем материала для глубокой сушки полимерного гранулята.

Созданы новые конструкции высокоэффективных секционированных аппаратов с закрученным взвешенным слоем материала для сушки полидисперсного вторичного полимерного гранулята, отличающиеся от существующих аппаратов улучшенной структурой потока твердой фазы и в 1,8–2,2 раза большей удельной производительностью.

Разработан новый способ упаковки гигроскопичных материалов и влагочувствительных изделий в герметичные пленочные чехлы для хранения и транспортировки в условиях влажного и сухого климата при стабильной заданной влажности внутренней среды, позволивший увеличить (при дополнительных затратах в 3 ... 5 % от стоимости упаковки) время хранения в 2–2,5 раза по сравнению с существующим методом. Предложена научно обоснованная методика кинетического расчета процесса паропроникновения в герметичных упаковках.

Правовая защищенность разработок обеспечивается 15 авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ на изобретения.

Результаты исследований, предложенные методы кинетического расчета и конструкции сушильной аппаратуры использованы на Тамбовском заводе "Электроприбор"; во ВНИИРТМаше при проектировании адсорберов для клеепромазочных машин и аппаратов для конвективно-радиационной сушки латексных пленочных изделий; для Арамильского завода пластических масс (Свердловская область) изготовлена и включена в технологический процесс установка для глубокой сушки полимерного гранулята; для ПК "Формула" изготовлен двухкорпусной сушильный комплекс для глубокой сушки гранулированных полимеров; на Мичуринском ПО "Прогресс" внедрены расчетные режимы сушки основных промышленных гранулированных полимерных материалов; для КФХ "Платан" (Тамбовская обл.) изготовлен сушильный комплекс для сушки зерновых культур; в ГНУ ВИИТиН использованы результаты исследований диффузионных характеристик зернопродуктов для разработки технологии, кинетического расчета и аппаратурного оформления процесса сушки зерновых культур в виброциркуляционном слое инертного зернистого теплоносителя.

Практические рекомендации по созданию промышленных сушильных аппаратов, результаты экспериментальных исследований и математического моделирования могут быть использованы для широкого класса зернистых материалов различных отраслей промышленности и сельского хозяйства.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на: Республиканской научной конференции "Процессы и аппараты производства полимерных материалов, методы и оборудование для переработки их в изделия" (Тамбов, 1974); Всесоюзной конференции "Процессы и аппараты производства полимерных материалов, методы и оборудование для переработки их в изделия" (Москва, 1977); Республиканской научной конференции "Сушка и грануляция продуктов микробиологического и тонкого химического синтеза" (Тамбов, 1981); 7-й Всесоюзной научно-технической конференции "Синтез и исследование эффективности химикатов для полимерных материалов" (Тамбов, НИИХИМполимер, 1982); Всесоюзной конференции "Процессы и оборудование для гранулирования продуктов микробиологического синтеза" (Тамбов, 1984); Всесоюзной конференции "Процессы и аппараты для микробиологических производств" (Грозный, 1986); Всесоюзной конференции "Современные машины и аппараты химических производств" (Чимкент, 1988); областной научно-технической конференции "Ученые вуза – производству" (Тамбов, 1989); Всесоюзной конференции "Процессы и аппараты для микробиологических производств" (Грозный, 1989);

Международном совещании-семинаре "Теплофизические проблемы промышленного производства" (Тамбов, 1992); 1-й научной конференции Тамбовского государственного технического университета (Тамбов, 1994); 2-й региональной научно-технической конференции "Проблемы химии и химической технологии" (Тамбов, 1994); международной научно-технической конференции "Прогрессивные технологии и оборудование пищевой промышленности" (Воронеж, 1997); 12-м международном конгрессе "CHISA-96" (Прага, 1996); Всероссийском научно-техническом семинаре "Высокоэффективные электротехнологии и биоинформационные системы управления АПК" (Москва, 1997); научных чтениях (Москва, МГУПБ, 1997); выездном заседании Головного Совета "Машиностроение" (Тамбов, 1997); 11-м международном симпозиуме "IDS-98" (Халькидики, Греция, 1998); 2-й региональной научно-технической конференции "Пищевая промышленность" (Казань, 1998); научно-технической конференции "Экология-98" (Тамбов, 1998); 5-й научной конференции Тамбовского государственного технического университета (Тамбов, 2000); 4-й Международной теплофизической школе "Теплофизические измерения в начале XXI века" (Тамбов, 2001); 15-ой Международной конференции "Математические методы в технике и технологии" – ММТТ-15 (Тамбов, 2002); 1-ой Международной научно-практической конференции "Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)" – СЭТТ-2002 (Москва, 2002).

Публикации. По материалам исследований опубликовано более 50 работ в международных, академических и отраслевых журналах и изданиях, получено 15 авторских свидетельств и патентов РФ на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, семь глав, основные результаты и выводы, список литературных источников (390 наименований) и 1 приложение. Работа изложена на 411 страницах основного текста, содержит 114 рисунков и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы диссертации; сформулированы цели и задачи работы; показана научная новизна, практическая ценность; перечислены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований.

1 Современное состояние методов исследования, моделирования, кинетического расчета и аппаратурного оформления конвективной сушки зернистых материалов. Проведен аналитический обзор литературных данных о состоянии теории и практики, проблемах и задачах в области конвективной сушки зернистых материалов. Процесс сушки этих материалов оказывает значительное влияние на энергетические и материальные затраты, а также на качество выпускаемой продукции, что предъявляет высокие требования к аппаратурно-технологическому оформлению и точности кинетического расчета.

Отмечено активное развитие теоретических методов кинетического расчета с получением необходимой дополнительной экспериментальной информации на основе физического моделирования процесса. Успешно развиваются методы кинетического расчета, основанные на раздельном рассмотрении микрокинетики и макрокинетики процесса конвективной сушки.

Обширную группу зернистых материалов представляют гранулированные ПМ, подвергающиеся процессу сушки как на стадии изготовления, так и переработки их в изделия. Непрерывно возрастающие требования к эффективности использования полимеров и ПМ с учетом жестких требований к качеству изделий на их основе обуславливают необходимость детального исследования их физических свойств.

Исследованию сорбционных и диффузионных свойств полимеров, необходимых для кинетического расчета процесса массопереноса, уделяется значительное внимание, что привело к развитию прогрессивных методов исследования на базе современной теории массопереноса.

На основании анализа сделаны следующие выводы:

– методы кинетического расчета, базирующиеся на эмпирических и полуэмпирических зависимостях, имеют ограниченную применимость и дают приближенные результаты; повышение точности расчетов на их основе приводит к значительному усложнению расчетных формул и к увеличению опытных величин;

– обоснованный кинетический расчет процесса глубокой конвективной сушки ПМ возможен лишь на основе глубоких знаний теплопереноса и гидродинамики исследуемых процессов в реальных условиях работы промышленных аппаратов;

– современный уровень знаний механизмов внутреннего массопереноса не позволяет теоретически установить концентрационно-температурную зависимость эффективного коэффициента диффузии, что обуславливает необходимость экспериментального определения диффузионных свойств влажных материалов;

– интенсивное развитие производства полимеров и разработка новых ПМ ставит задачу массового измерения диффузионных свойств, решение которой возможно лишь при использовании высокопроизводительных методов и средств;

– жесткие требования к качеству высушенного полимерного гранулята (низкое конечное влагосодержание продукта, минимальная дисперсия по конечному влагосодержанию материала, отсутствие термодеструкции) обуславливают необходимость создания новых конструкций сушильных аппаратов;

– использование пленочных ПМ для целей консервации машиностроительной продукции является весьма перспективным и имеет ряд ценных преимуществ по сравнению с другими методами упаковки; эффективность метода герметичной упаковки в полимерные чехлы определяется временем гарантированного хранения при допустимой влажности внутренней среды;

– использование герметичных пленочных упаковок имеет существенный недостаток, заключающийся в низкой первоначальной влажности внутренней среды, что является неприемлемым для целого ряда гигроскопических материалов.

На основании проведенного анализа современных методов исследования диффузионных характеристик влажных материалов, методов кинетического расчета процесса конвективной сушки и аппаратного оформления процесса глубокой сушки гранулированных ПМ и методов кинетического расчета герметичных полимерных упаковок сформулированы следующие задачи:

– исследование структурно-сорбционных и диффузионных свойств промышленных гранулированных и пленочных ПМ в интервалах концентраций и температур, имеющих место в производственных условиях;

– анализ диффузионных свойств промышленных гранулированных и пленочных ПМ, оценка влияния воды на эффективный коэффициент диффузии в широком интервале температур; обобщение диффузионных характеристик гранулированным ПМ с целью использования для анализа и кинетического расчета процесса глубокой сушки на основе решения уравнения диффузии;

– разработка нестационарного метода определения эффективного коэффициента диффузии низкомолекулярных соединений для полидисперсных гранулированных ПМ;

– разработка автоматизированной установки для определения диффузионных свойств гранулированных ПМ с большой величиной внутридиффузионного сопротивления в области низких значений влагосодержания;

– разработка математической модели процесса глубокой конвективной сушки гранулированных ПМ с большой величиной внутридиффузионного сопротивления;

– оценка влияния неоднородности частиц высушиваемого материала по их дисперсному составу и времени пребывания в аппарате на точность кинетического расчета процесса глубокой конвективной сушки гранулированных ПМ;

– разработка научно обоснованного выбора аппаратно-технологического оформления процесса глубокой конвективной сушки гранулированных ПМ;

– исследование структуры потока твердой фазы в сушильном аппарате шахтного типа с поперечно продуваемым кольцевым слоем материала;

– исследование кинетики конвективного нагрева и глубокой конвективной сушки плотного кольцевого слоя гранулированных ПМ;

– разработка конструктивных решений сушильных аппаратов с поперечно продуваемым кольцевым слоем материала для глубокой конвективной сушки гранулированных ПМ;

– разработка методики расчета процесса глубокой конвективной сушки гранулированных ПМ в сушильных аппаратах шахтного типа с поперечно продуваемым кольцевым слоем материала;

– разработка конструктивных решений сушильных аппаратов с закрученным взвешенным слоем материала для конвективной сушки вторичного полидисперсного гранулята;

– разработка нового метода герметичной упаковки для хранения гигроскопических материалов в условиях влажного и сухого климата при жестких ограничениях влажности внутренней среды;

– разработка новой методики расчета времени хранения гигроскопичных материалов и продукции в герметичной полимерной упаковке в условиях влажного и сухого климата при жестких ограничениях влажности внутренней среды.

2 Структурно-сорбционные и диффузионные характеристики исследуемых гранулированных и пленочных полимерных материалов. Производство и переработка обширного ассортимента ПМ, выпускаемых в гранулированном виде, неразрывно связаны с удалением внешней и внутренней влаги. Практически все гранулированные ПМ перед переработкой литьем под давлением или экструзией подвергаются процессу глубокой сушки, отличающейся значительной продолжительностью и, как следствие, большой энергоемкостью. В качестве объектов исследования выбраны гранулированные ПМ с большой величиной внутридиффузионного сопротивления, имеющие промышленное значение (табл. 1). В выбранной группе представлены основные типы ПМ по отношению к воде и находящиеся при температурных режимах производственной сушки и исследования как в высокоэластическом, так и застеклованном состоянии.

Гранулированные ПМ при отсутствии специального воздействия, направленного на развитие пористой структуры, характеризуются весьма малой или полностью отсутствующей пористостью и небольшой удельной поверхностью, существенным преобладанием абсорбционных явлений над адсорбцией и капиллярной конденсацией. Изотермы исследованных материалов в области высоких значений влажности среды не выявили капиллярной конденсации. Отсутствие сорбционного гистерезиса для полимерных материалов, находящихся в высокоэластическом состоянии, свидетельствует об отсутствии транспортно значимых пор.

Для полимерных материалов, находящихся в условиях экспериментов в высокоэластическом состоянии (П-12Э, ПЭТФ, полипропилен), отмечена незначительная температурная зависимость сорбции. Для полимерных материалов в стеклообразном состоянии (поликарбонат) наблюдается сорбционно-десорбционный гистерезис во всем диапазоне относительной влажности среды. При наличии только капиллярной конденсации гистерезис возможен лишь в области больших значений относительной влажности ($\varphi > 0,5 \dots 0,6$).

Для поликарбоната гистерезис захватывает и начальную часть изотермы сорбции-десорбции с заметным увеличением его относительного значения. Такое явление обусловлено малой подвижностью макромолекул застеклованного полимерного материала, что влияет на скорость протекания релаксационных процессов в матрице полимера.

По мере увеличения количества сорбированного вещества проявляется его пластифицирующее действие. Релаксационные процессы ускоряются, и структура полимерного материала приближается к равновесной. Для стеклообразных полимеров с микропористой структурой сорбционный гистерезис (полистиролы) характерен для всей области влагосодержания среды, что указывает на абсорбционный и адсорбционный механизмы поглощения сорбата.

Получено аналитическое описание температурной зависимости равновесного влагосодержания ПМ, позволяющее производить дифференцированный учет движущей силы процесса внутреннего массопереноса по длине аппарата.

Для определения опытных данных по эффективным коэффициентам диффузии в зернистых и пленочных ПМ в зависимости от концентрации распределяемого компонента, что является одной из важнейших задач исследований в области массообмена в системах с твердой фазой, разработаны методики и экспериментальные установки. Для определения эффективного коэффициента диффузии влаги в ПМ использован зональный метод, основанный на интегрировании дифференциального уравнения диффузии при условии постоянства D , в узком интервале изменения концентрации распределяемого компонента.

1 Основные характеристики исследуемых гранулированных полимерных материалов

Полимерный материал	Параметры сушки		$t_{\text{плавл.}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	Вид и размеры гранул, м
	$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$C_k, \%$		

Полиамид П-12 Э	90 ... 100	0,2	178 ... 180	Цилиндр $l = 2,5 \cdot 10^{-3}$; $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$
Полиамид П-610Л	80 ... 90	0,15	213 ... 222	Цилиндр $l = 3,3 \cdot 10^{-3}$; $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$
Полиамид П-610Л-СВ-30	75 ... 85	0,2	213 ... 222	Цилиндр $l = 3,2 \cdot 10^{-3}$; $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$
Полиэтилен- терефталат марки А	110 ... 120	0,05	250 ... 257	Пластина $(4,2 \cdot 3,4 \cdot 3,2) \cdot 10^{-3}$
Полипропилен	80 ... 90	0,1	160 ... 170	Цилиндр $l = 4,2 \cdot 10^{-3}$; $d = 2,4 \cdot 10^{-3}$
АБС-пластик 1210	80 ... 85	0,1	96 ... 100	Сфера $d = 3,2 \cdot 10^{-3}$
СФД ВМ-БС	80 ... 85	0,2	198 ... 172	Цилиндр $l = 3,2 \cdot 10^{-3}$; $d = 3,3 \cdot 10^{-3}$
Поликарбонат "Дифлон"	130 ... 140	0,02	220 ... 240	Цилиндр $l = 3,2 \cdot 10^{-3}$; $d = 2,3 \cdot 10^{-3}$
Полистирол "Stiron"	70 ... 80	0,1	110 ... 120	Цилиндр $l = 3,0 \cdot 10^{-3}$; $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$
Полистирол ПСМ-115	70 ... 80	0,1	100 ... 110	Цилиндр $l = 3,1 \cdot 10^{-3}$; $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$
Полистирол УПМ-0703 Л	70 ... 80	0,1	95 ... 100	Цилиндр $l = 3,2 \cdot 10^{-3}$; $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$

Эффективные коэффициенты диффузии влаги для всех исследованных ПМ (рис. 1) возрастают с увеличением влагосодержания и существенно зависят от температуры материала. Низкие значения эффективных коэффициентов диффузии влаги ($D_3 = 10^{-11} \dots 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$) обусловлены непористым строением исследованных полимеров и транспортом влаги путем молекулярной диффузии.

Однотипность функций $D_3 = f(C)$ свидетельствует о едином механизме миграции диффузанта в исследуемых материалах. Возрастание эффективного коэффициента диффузии с увеличением концентрации распределяемого компонента можно объяснить тем, что при диффузии молекул воды увеличивается количество микрополостей между молекулами полимера. Это явление связано с пластифицирующим воздействием воды и, в ряде случаев, с уменьшением степени кристалличности полимеров. Наличие воды в полимерной матрице существенно уменьшает межмолекулярные силы полимера и обуславливает повышенную сегментальную подвижность. Эффективный коэффициент диффузии D_3 является сложной величиной, включающей в себя коэффициент диффузии D_A низкомолекулярного вещества, термодинамический фактор, учитывающий неидеальность системы, параметр, дающий поправку на выравнивающий поток, структурный фактор и степень кристалличности.

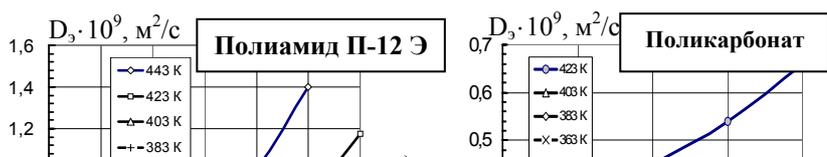


Рис. 1 Характерные температурно-влажностные зависимости
коэффициента диффузии влаги в ПМ:

в высокоэластичном (*a*) и стекловидном (*б*) состояниях; в стекловидном состоянии
с микропористой структурой (*в*); в пленочных коллоидных-капиллярнопористых
с изменяющейся в процессе сушки структурой (*г*)

Энергия активации процесса диффузии E_D , определяемая через тангенс угла наклона линий $\lg D = f(1 / T)_C$, уменьшается с увеличением влагосодержания материала. Указанное явление хорошо согласуется с

теорией дырочной проводимости. Уменьшение энергии активации связано с пластифицирующим воздействием воды, которое приводит к увеличению подвижности молекулярных сегментов полимера. Энергия активации для исследованных ПМ находится в пределах $(20 \dots 60) \cdot 10^3$ кДж/кмоль, что хорошо согласуется с данными других исследований.

Анализ температурно-влажностной зависимости коэффициента эффективной диффузии воды для исследованной группы ПМ показал необходимость дифференцированного учета влияния изменяющегося температурного и влажностного состояния материала на кинетику процесса сушки в реальных аппаратах.

Зависимости $D_3 = f(C, T)$ для ряда исследованных ПМ аппроксимированы формулой вида

$$D_3 = D_0 \exp \left[-bC - \frac{E_D(1-dC)}{R_g T} \right] \text{ м}^2/\text{с}, \quad (1)$$

где D_0 – формальное значение эффективного коэффициента диффузии при температуре $T \rightarrow \infty$; b, d – константы опытного уравнения;

При отсутствии справочных данных по коэффициентам диффузии воды в гранулированных и пленочных ПМ практическую ценность представляют обобщенные зависимости для расчета эффективного коэффициента молекулярной диффузии, требующие минимальной информации о структуре полимера и его сорбционных свойствах.

Исходя из того, что основным параметром структуры полимера, оказывающим влияние на диффузию распределяемого вещества в нем, является объемная доля аморфной фазы $\varepsilon_{ам}$, получено обобщенное уравнение для определения эффективного коэффициента диффузии при экстрагировании водных растворов низкомолекулярных соединений из полимерных материалов, а также при сушке и сорбции воды смачивающихся полимеров в высокоэластическом состоянии:

$$D_{3,C \rightarrow 0} = D_{\infty,C \rightarrow 0} \exp \left(-\frac{E_{D,C \rightarrow 0}^*}{R_g T} \right), \quad (2)$$

где $D_{\infty,C \rightarrow 0} = \exp(-11 \varepsilon_{ам})$; $E_{D,C \rightarrow 0}^* = 78 \cdot 10^3 (1 - 0,475 \varepsilon_{ам})$.

Учитывая значительный и постоянно обновляющийся ассортимент полимеров и ПМ на их основе, а также необходимость создания базы данных по диффузионным свойствам зернистых материалов, разработана и внедрена в исследовательскую практику автоматизированная система научных исследований (АСНИ) для определения диффузионных свойств дисперсных материалов, позволяющая оперативно определять технологические параметры сушки при переходе с одного вида ПМ на другой.

3 Математическое моделирование процесса конвективной сушки гранулированных полимерных материалов. В соответствии с системным подходом при рассмотрении процесса глубокой конвективной сушки гранулированных ПМ общая кинетическая задача декомпозирована на два основных подуровня: микро- и макрокинетический. На нижнем (микрокинетическом уровне) рассматривается кинетика сушки единичной частицы полимера или элементарного (дифференциально тонкого) слоя. Для описания микрокинетики выбирается подвижная (лагранжева) система координат, которая связана с рассматриваемой частицей, перемещающейся по аппарату.

На верхнем (макрокинетическом) подуровне учитываются конструктивные, гидродинамические и тепломассообменные особенности рассматриваемого типа аппарата (тип и конструкция аппарата,

схема движения взаимодействующих фаз, условия их ввода в аппарат, структура потоков, условия теплообмена и т.д.).

В соответствии с таким подходом математическая модель процесса на нижнем подуровне (например, для сферической гранулы) представлена в следующем виде:

$$\frac{\partial C_{(r,\tau)}}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r D_{(c,\tau)} \frac{\partial C_{(r,\tau)}}{\partial r} \right], \quad 0 < r < R, \quad \tau > 0; \quad (3)$$

$$C_{(r,\tau)} = C_{n(r)}, \quad 0 \leq r \leq R, \quad \tau = 0; \quad (4)$$

$$C_{(r,\tau)} = C_p, \quad r = R, \quad \tau > 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_{(r,\tau)}}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad \tau > 0. \quad (6)$$

При переходе в описании кинетики процесса с микро- на макроуровень большое значение имеет учет неоднородности частиц по размерам и по времени пребывания в аппарате. Эти факторы существенны не только для точности кинетического расчета, но и для равномерности сушки, т.е. для качества высушиваемого продукта. Для ПМ это особенно важно, так как использование неравномерно высушенного полимерного гранулята приводит к браку изделий.

Влияние этих неоднородностей определено по уравнению

$$\bar{C} = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} f(R) \int_0^{\infty} f(\tau) \bar{C}(R, \tau) dR d\tau, \quad (7)$$

где $f(R)$, $f(\tau)$ – дифференциальные массовые функции распределения частиц по размерам и по времени пребывания в аппарате; $C(R, \tau)$ – микрокинетическая зависимость для единичных гранул размером R .

Для численного анализа влияния рассматриваемых неоднородностей использовано решение дифференциального уравнения диффузии влаги при граничном условии первого рода

$$\bar{E} = \sum_0^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 Fo_m). \quad (8)$$

При нормальном законе распределения частиц по размерам $f(R)$ и по времени пребывания в аппарате $f(\tau)$:

$$f(R) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(R-\bar{R})^2}{2\sigma_R^2}}; \quad f(\tau) = \frac{1}{\sigma_\tau \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma_\tau^2}};$$

получено

– для сферы:

а) для учета полидисперсности

$$\bar{E}_R = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{\sigma_\Psi \sqrt{2\pi}} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} e^{-\left[\mu_n^2 \frac{Fo_m}{\Psi^2} + \frac{(\Psi-1)^2}{2\sigma_\Psi^2} \right]} d\Psi; \quad (9)$$

б) для учета неоднородности по времени пребывания

$$\bar{E}_\tau = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{\sigma_\theta \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\left[\mu_n^2 Fo_{m0} + \frac{(\theta-1)^2}{2\sigma_\theta^2} \right]} d\theta, \quad (10)$$

где $\sigma_\Psi = \sigma_R / \bar{R}$ и $\sigma_\theta = \sigma_\tau / \bar{\tau}$ – дисперсии величин $\Psi = R / \bar{R}$ и $\theta = \tau / \bar{\tau}$; $\bar{R} = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} f(R) R dR$ и $\bar{\tau} = \int_0^\infty f(\tau) \tau d\tau$ – средние

значения математического ожидания величин R и τ ;

– для цилиндрической гранулы

$$\bar{\bar{E}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{цл,n}}{\sigma_{\Psi_1} \sqrt{2\pi}} \int_{\Psi_{1\min}}^{\Psi_{1\max}} e^{-\left[\mu_n^2 \frac{D_3 \tau}{R_1^2 \Psi_1^2} + \frac{(\Psi_1 - 1)^2}{2\sigma_{\Psi_1}^2} \right]} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{пл,n}}{\sigma_{\Psi_2} \sqrt{2\pi}} \int_{\Psi_{2\min}}^{\Psi_{2\max}} e^{-\left[\mu_n^2 \frac{D_3 \tau}{R_2^2 \Psi_2^2} + \frac{(\Psi_2 - 1)^2}{2\sigma_{\Psi_2}^2} \right]} d\Psi_1 d\Psi_2; \quad (11)$$

– для пластинчатой гранулы

$$\bar{\bar{E}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{пл,n}}{\sigma_{\Psi_1} \sqrt{2\pi}} \int_{\Psi_{1\min}}^{\Psi_{1\max}} F_1(\Psi_1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{пл,n}}{\sigma_{\Psi_2} \sqrt{2\pi}} \int_{\Psi_{2\min}}^{\Psi_{2\max}} F_2(\Psi_2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{пл,n}}{\sigma_{\Psi_3} \sqrt{2\pi}} \int_{\Psi_{3\min}}^{\Psi_{3\max}} F_3(\Psi_3) d\Psi_1 d\Psi_2 d\Psi_3 \quad (12)$$

где

$$F_1(\Psi_1) = e^{-\left[\mu_n^2 \frac{D_3 \tau}{R_1^2 \Psi_1^2} + \frac{(\Psi_1 - 1)^2}{2\sigma_{\Psi_1}^2} \right]}; \quad F_2(\Psi_2) = e^{-\left[\mu_n^2 \frac{D_3 \tau}{R_2^2 \Psi_2^2} + \frac{(\Psi_2 - 1)^2}{2\sigma_{\Psi_2}^2} \right]}; \quad F_3(\Psi_3) = e^{-\left[\mu_n^2 \frac{D_3 \tau}{R_3^2 \Psi_3^2} + \frac{(\Psi_3 - 1)^2}{2\sigma_{\Psi_3}^2} \right]}. \quad (13)$$

Численный анализ уравнений (9)–(12) показал существенное влияние дисперсий σ_Ψ и σ_θ на зависимость $\bar{\bar{E}} = f(Fo_m)$. Анализ отношений $\delta_\Psi = Fo_{m, \sigma_\Psi \neq 0} / Fo_{m, \sigma_\Psi = 0}$ и $\delta_\theta = Fo_{m, \sigma_\theta \neq 0} / Fo_{m, \sigma_\theta = 0}$ свидетельствует о том, что при кинетическом расчете макрокинетики глубокой сушки следует во избежание существенных ошибок определения времени сушки учитывать полидисперсность материала и интенсивность продольного перемешивания материала в аппарате (рис. 2).

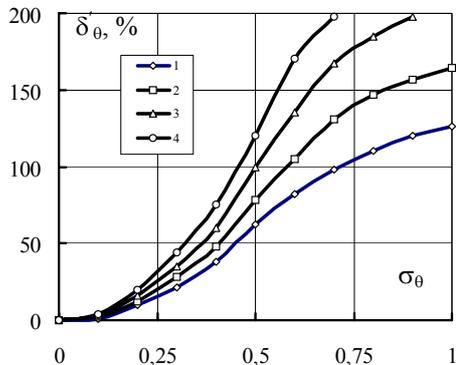


Рис. 2 К определению ошибки кинетического расчета процесса глубокой сушки ПМ при дисперсии частиц по времени пребывания в аппарате:

1 – $\bar{E} = 0,01$; 2 – $\bar{E} = 0,015$;
3 – $\bar{E} = 0,02$; 4 – $\bar{E} = 0,03$;

Учет суммарного воздействия неоднородностей по размерам и по времени пребывания (для сферической гранулы) проведен по уравнению

$$\bar{\bar{E}}_{(R,\tau)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{с,n}}{2\pi \cdot \sigma_\Psi \sigma_\theta} \int_{\Psi_{\min}}^{\Psi_{\max}} \int_0^\infty e^{-\left[\mu_n^2 \frac{Fo_m \theta}{\Psi^2} + \frac{(\theta - 1)^2}{2\sigma_\theta^2} + \frac{(\Psi - 1)^2}{2\sigma_\Psi^2} \right]} d\theta \cdot d\Psi; \quad (14)$$

Аналогичный расчет проведен для гранул, имеющих форму ограниченного цилиндра и ограниченной пластины.

На основании проведенного анализа разработан зональный метод определения зависимости эффективного коэффициента диффузии от концентрации распределяемого компонента, учитывающий реальную полидисперсность материалов.

4 Аппаратурно-технологическое оформление процесса глубокой сушки гранулированных полимерных материалов. Проведен анализ существующего сушильного оборудования; установлены основные недостатки проведения процесса глубокой сушки, приводящие к существенной неоднородности конечного влагосодержания материала. Обоснован выбор сушильных аппаратов шахтного типа с поперечно продуваемым кольцевым слоем материала для проведения глубокой конвективной сушки гранулированных ПМ.

Экспериментальные исследования кинетики нагрева и сушки плотного продуваемого слоя, выполненные на модельных установках, показали, что процессу глубокой сушки ПМ присущи следующие кинетические особенности:

- в силу большой величины внутридиффузионного сопротивления скорость процесса полностью контролируется миграцией влаги внутри частиц;
- равновесная влажность материала соизмерима с его конечной влажностью и оказывает значительное влияние на кинетику сушки;
- материал в процессе сушки быстро прогревается до температуры сушильного агента и сушка протекает в условиях практического равенства температур взаимодействующих фаз.

Определены оптимальные условия проведения глубокой сушки гранулированных ПМ: ускоренный прогрев высушиваемого материала (до предельно допустимой температуры) для увеличения эффективного коэффициента диффузии влаги; уменьшение внешедиффузионного сопротивления переносу влаги внутри порового пространства слоя; увеличение движущей силы процесса сушки путем снижения влагосодержания теплоносителя; достижение минимальной неоднородности высушенного материала по конечному влагосодержанию.

Экспериментально исследована структура потока твердой фазы в аппаратах шахтного типа с поперечно продуваемым кольцевым слоем материала. Определены физико-механические свойства гранулированных ПМ (углы естественного, динамического откоса и обрушения, порозность неподвижного и движущегося слоев), изучено влияние стесненности потока твердой фазы, сетчатых и перфорированных стенок на характер движения твердой фазы. Разработаны и экспериментально проверены конструктивные решения, существенно улучшающие структуру потока твердой фазы и устраняющие образование застойных зон в рабочей зоне аппаратов.

Применительно к выбранному типу аппарата поставлена и решена задача несвязанного тепло-массообмена. Полученные аналитические решения использованы для расчета стадии прогрева и сушки гранулированных ПМ в продуваемом слое в аппаратах шахтного типа.

На основе проведенных исследований процесса сушки гранулированных ПМ и анализа особенностей массопереноса разработан ряд непрерывно действующих сушильных аппаратов шахтного типа, учитывающих те или иные особенности процесса: однозонная сушилка, двухзонная сушилка с подачей двух потоков теплоносителей с разными температурно-влажностными потенциалами (рис. 3), двухзонная сушилка с регулируемой высотой рабочих зон, двухкамерная сушилка, зерносушилка с зоной охлаждения. Все сушилки содержат четыре технологические зоны: загрузки и формирования слоя, нагрева, изотермической сушки и термостатирования (охлаждения). Подача влажного гранулята осуществляется пневмотранспортом или из бункеров-накопителей в верхнюю часть сушилок. Скорость движения слоя материала (1 ... 3 м/ч) задается секторным питателем, расположенным в выпускной части аппаратов. Толщина слоя материала составляет 0,1 ... 0,2 м. Режим движения твердой фазы при рекомендуемых углах наклона стенок (3 ... 5°) близок к режиму идеального вытеснения.

Разработаны методики проектного и технологического расчетов процесса глубокой сушки гранулированных ПМ, учитывающие для повышения точности кинетического расчета дисперсию гранулированных материалов по размерам, неоднородность по времени пребывания материала в рабочей зоне аппарата, время достижения изотермических условий сушки, изменение движущей силы процесса по направлению движения сушильного агента в слое материала. В аппаратах с явно выраженной протяженностью сушильного тракта, к которым относятся и разработанные шахтные сушилки, параметры процесса сушки изменяются по длине рассматриваемой фазы, поэтому расчет кинетики на основе разработанных математических моделей рекомендуется проводить зональным методом с разбиением всей длины потока твердой фазы на ряд элементарных зон и позонным заданием параметров процесса. По полученным аналитическим решениям конвективного нагрева продуваемого слоя производится расчет кинетики нагрева последнего по ходу теплоносителя элементарного слоя до дости-

жения изотермических условий сушки

($t_m = 0,95 t_c$). Весь диапазон изменения влагосодержания материала ($\bar{C}_{m,h} \dots \bar{C}_{m,k}$) разбивается на ряд концентрационных зон (оптимальное количество зон 5 ... 6).

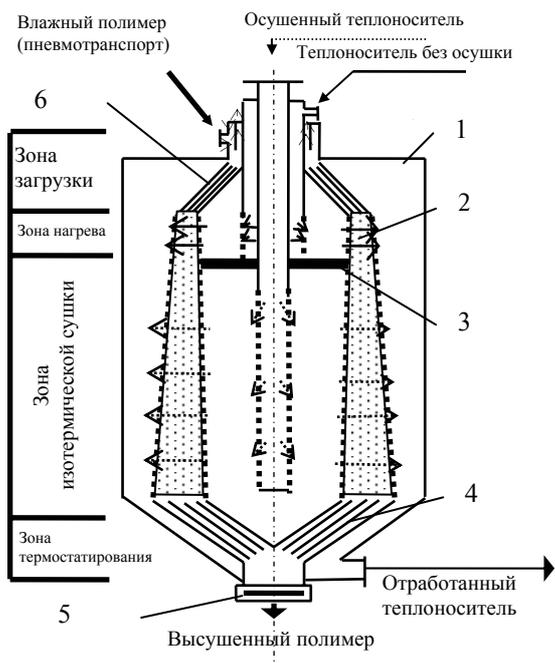


Рис. 3 Шахтная двухзонная сушилка с кольцевым слоем дисперсного материала:

- 1 – корпус сушилки;
- 2 – рабочая камера с сетчатыми или перфорированными стенками;
- 3 – перегородка;
- 4, 6 – направляющие конусы;
- 5 – секторный питатель

Кинетический расчет процесса сушки проводится для последнего по ходу движения сушильного агента элементарного слоя материала с учетом увеличения влагосодержания сушильного агента и соответствующего увеличения равновесного влагосодержания высушиваемого материала. Расчет конечного влагосодержания сушильного агента на выходе из слоя для каждой концентрационной зоны производится с учетом количества влаги, удаленной из твердой фазы по уравнениям (9), (11), (12). При этом диффузионные и сорбционные характеристики полимерного материала определяются при усредненных значениях параметров в расчетной концентрационной зоне.

Экспериментальная проверка предлагаемой методики, проведенная на установке, моделирующей неподвижный плотный поперечно продуваемый кольцевой слой, на установке с движущимся (скорость движения материала 0,1 ... 0,5 м/ч) плотным поперечно продуваемым кольцевым слоем, на шахтной сушилке периодического действия с регулируемым объемом рабочей камеры и на шахтной сушилке непрерывного действия (рис. 4), показала удовлетворительную для инженерной практики точность (ошибка кинетического расчета не превышала 16 %).

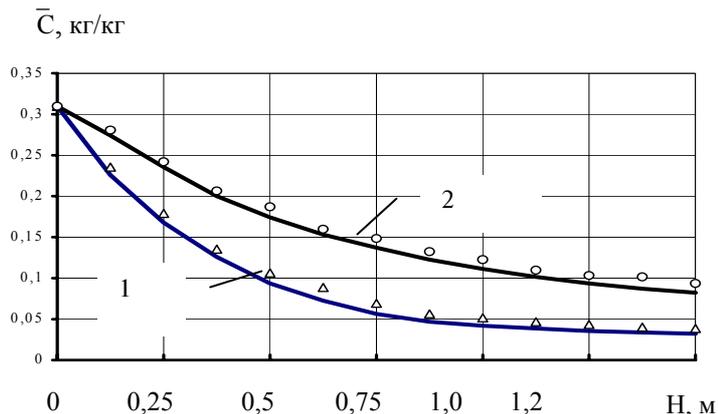


Рис. 4 Сравнение опытного и расчетного изменения влагосодержания элементарного слоя материала (последнего по ходу теплоносителя) по высоте сушилки (рис. 3):

высушиваемый ПМ – (АВС-пластик); толщина слоя материала – 0,1 м;
скорость движения слоя – 0,181 м/ч; скорость теплоносителя в слое – 0,2 м/с;
температура сушильного агента: 1 – $T_c = 373$ К; 2 – $T_c = 343$ К;
линии – расчет по предложенной методике; точки – опытные данные

5 Аппаратурно-технологическое оформление процесса сушки вторичного гранулята. Сушка от поверхностной влаги вторичного полимерного гранулята, характеризующегося значительной полидисперсностью, разнообразием форм частиц, агрегатообразованием при локальной концентрации влаги и термочувствительностью материалов, представляет сложную задачу. Исследование вторичного гранулята выявило существенную неоднородность частиц вторичного гранулята по размерам и значительную неоднородность по начальному влагосодержанию.

Анализ процесса конвективной сушки вторичного гранулята от поверхностной влаги показал целесообразность применения аппаратов с активными гидродинамическими режимами (сушилки с закрученным взвешенным слоем материала).

Экспериментальное исследование конвективной сушки в аппаратах с закрученным слоем материала и численный анализ математической модели процесса тепломассопереноса определили следующие направления повышения эффективности существующих конструкций: последовательное секционирование аппаратов по твердой фазе, улучшение структуры потока твердой фазы, использование независимых параметров теплоносителя по секциям, увеличение удерживающей способности и времени пребывания материала в рабочей зоне аппарата.

Разработаны и изготовлены новые конструкции двух- (рис. 5) и четырехсекционных сушилок с взвешенным слоем материала. Экспериментальное исследование конвективной сушки вторичного полимерного гранулята в новых конструкциях и сравнение с базовым однокорпусным аппаратом установило:

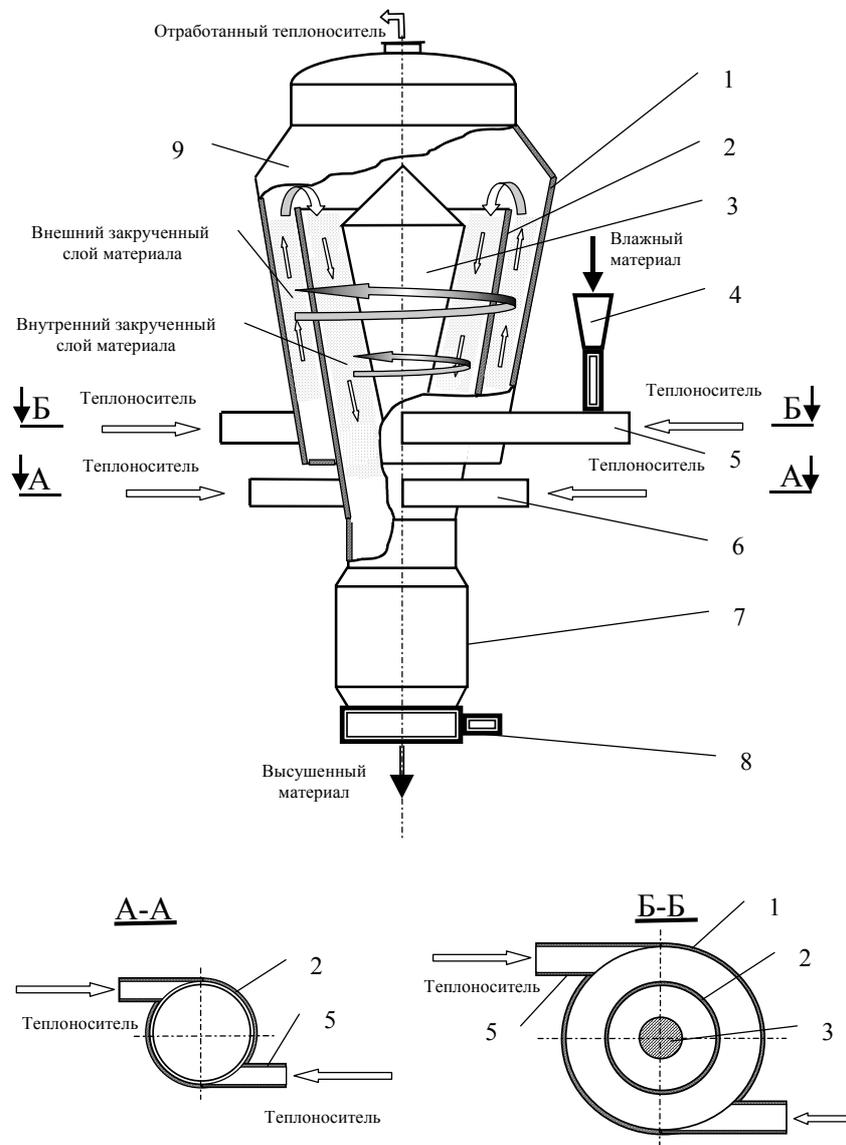


Рис. 5 Двухсекционная сушилка с закрученным слоем материала:

- 1 – внешний конус; 2 – внутренний конус; 3 – биконическая вставка;
 4 – питатель; 5, 6 – патрубки подачи теплоносителя;
 7 – приемный бункер; 8 – барабанный затвор;
 9 – сепарационная камера

- увеличение объемных коэффициентов тепло- и массоотдачи на 25 ... 35 %;
- существенное улучшение структуры потока твердой фазы ($Pe_T = 15 \dots 24$ в двух и четырехсекционных аппаратах и $Pe_T = 2 \dots 5$ – в односекционных);
- увеличение удерживающей способности в 1,8–2,2 раза;
- увеличение времени пребывания в аппарате в 2–2,5 раза;
- увеличение напряжения по испарившейся влаге в 1,7–2,1 раза.

Для многокорпусных аппаратов проведено определение локальной порозности взвешенных слоев по секциям, показавшее, что порозность слоя ϵ не является постоянной величиной по высоте аппарата. По мере продвижения закрученного потока по высоте аппарата происходит вырождение закрутки и вертикальная составляющая скорости газовой фазы увеличивается, что обуславливает увеличение порозности слоя ϵ закрученного взвешенного материала от начального $\epsilon_n \approx 0,7$ до конечного $\epsilon_k \approx 1$.

Для кинетического расчета разработанных аппаратов получена критериальная зависимость объемного коэффициента массоотдачи

$$Nu_{m,v} = 1,067 \cdot 10^{-5} Re^{1,74} Ar^{0,11} Gu^{0,14} Pr^{0,35} K_a^{1,15}, \quad (15)$$

где $Re = (1,5 \dots 2,2) \cdot 10^3$; $Ar = (6 \dots 12) \cdot 10^5$; $Gu = 0,4 \dots 0,5$; $Pr_m = 0,8 \dots 0,82$; $K_a = 0,1 \dots 0,3$.

Даны рекомендации по расчету кинетики сушки полидисперсного вторичного гранулята с учетом неравномерного начального влагосодержания.

6 Разработка способов и технологии хранения гигрочувствительных материалов и продукции в герметичной полимерной упаковке при жестких требованиях к влажности внутренней среды. Проведено экспериментальное исследование процесса массопереноса при хранении гигрочувствительных материалов и продукции в герметичной пленочной упаковке, показавшее необходимость учета затухающего характера процесса при проведении кинетических расчетов. Выполнен сопоставительный анализ диффузионных сопротивлений процесса массопереноса в герметичных полимерных упаковках, выявивший необходимость дифференцированного учета изменения кинетических коэффициентов при расчете процесса паропроницания. Разработана методика кинетического расчета процесса паропроницания герметичных упаковок на основе сорбционных и диффузионных характеристик упаковочных полимерных материалов, позволяющая учитывать изменение физических параметров в ходе процесса. Предложен новый способ герметичного упаковывания материалов и изделий в полимерные пленки, обеспечивающий поддержание заданной влажности среды хранения в условиях влажного и сухого климата при жестких ограничениях влажности внутренней среды. Сущность нового способа заключается в применении дополнительного пленочного чехла, в который помещаются адсорбенты с крутыми и емкими участками изотерм сорбции-десорбции (рис. 6).

Кинетику паропроницания в герметичных упаковках при жестких ограничениях влажности среды хранения предлагается рассчитывать по следующей методике:

1) формирование блока исходных данных, в который входят: время хранения упакованных изделий (τ_{xp}); температура (T_c) и влагосодержание окружающей среды (C_{c1}); рекомендуемое для хранения изделий влагосодержание внутренней

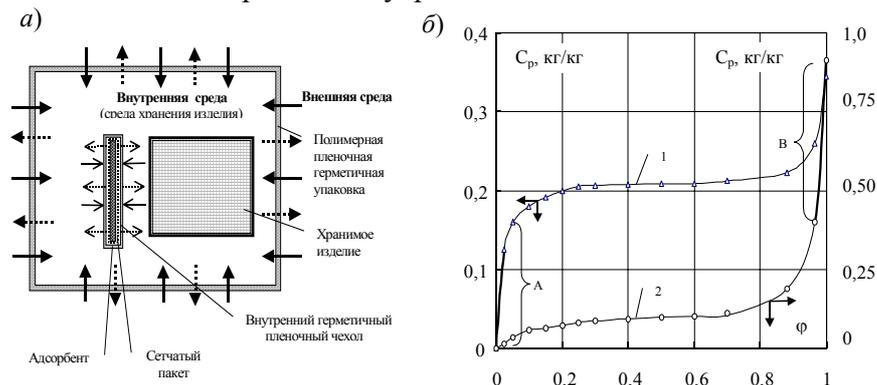


Рис. 6 Хранение изделий в герметичной полимерной упаковке:

a – новый способ хранения в условиях влажного и сухого климата при жестких ограничениях влагосодержания внутренней среды; *б* – изотермы сорбции-десорбции рекомендуемых адсорбентов (1 – активная окись алюминия; 2 – силикагель КСК)

среды упаковки (C_{c2}); площадь поверхности основной полимерной упаковки (F_{oc}); толщина основной упаковочной полимерной пленки ($2R_{oc}$); сорбционная ($C_{oc,p} = f(C_c, T_c)$) и диффузионная характеристики ($D_{э,oc} = f(C_{oc}, T_{oc})$) основной упаковочной полимерной пленки; толщина полимерной пленки дополнительного внутреннего чехла ($2R_d$); сорбционная ($C_{d,p} = f(C_c, T_c)$) и диффузионная характеристики ($D_{э,d} = f(C_d, T_d)$) полимерной пленки дополнительного внут-

ренного чехла; сорбционные ($C_{a,p} = f(C_c, T_c)$) свойства применяемых адсорбентов (при высоком влагосодержании внешней среды выбираются адсорбенты с изотермой первого типа, при низком – адсорбенты с изотермой второго типа (рис. 8));

2) определение значений $C_{a,n}$ и $C_{a,k}$ используемого крутого и емкого участка изотерм сорбции-десорбции (участок А или участок В (рис. 6, б) в зависимости от условий протекания процесса массопереноса;

3) нахождение по известным значениям влагосодержания газовых сред C_{c1}, C_{c2}, C_{c3} по изотермам сорбции полимерных пленок основного и внутреннего чехлов равновесных влагосодержаний наружных и внутренних сторон полимерных пленок $C_{oc,n}, C_{oc,v}, C_{д,н}, C_{д,в}$;

4) расчет среднеинтегральных значений эффективного коэффициента диффузии $\bar{D}_{э,oc}$ и $\bar{D}_{э,д}$ для полимерных пленок основного и дополнительного чехлов;

5) определение площади поверхности дополнительного чехла F_d :

$$F_d = F_{oc} \cdot \frac{\rho_{oc} \bar{D}_{oc} (C_{oc,v} - C_{oc,n}) 2R_{oc}}{\rho_d \bar{D}_d (C_{д,в} - C_{д,н}) 2R_d}, \quad (16)$$

6) нахождение плотности потока i_{oc} (или i_d) и потока $G_{п}$ водяного пара, прошедшего через упаковку;

7) определение требуемого количества адсорбента для обеспечения заданных условий на протяжении всего срока хранения.

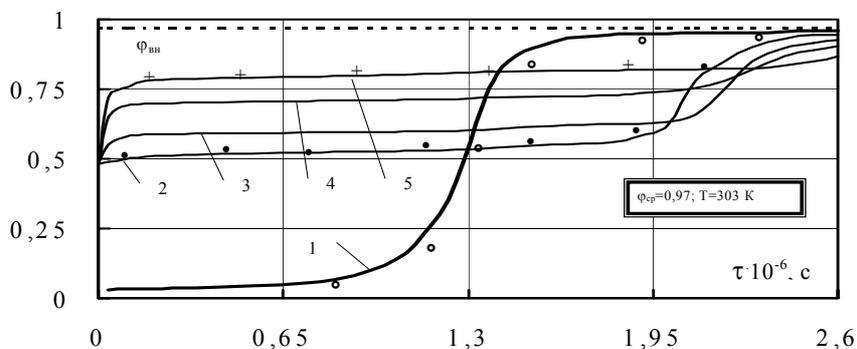


Рис. 7 Изменение относительной влажности внутренней газовой среды в упаковках в зависимости от времени хранения (внешняя среда – влажная):

1 – упаковка по традиционному способу в один внешний чехол; 2, 3, 4, 5 – упаковка с размещением адсорбента в дополнительный чехол с разной площадью поверхности; линии – измерение влагомером; точки – расчет по предложенным методикам

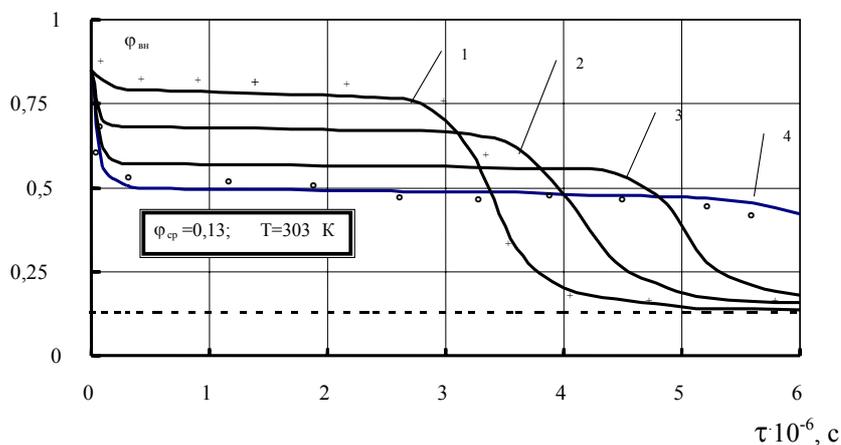


Рис. 8 Изменение относительной влажности внутренней газовой среды в упаковках в зависимости от времени хранения (внешняя среда – сухая):

1, 2, 3, 4 – упаковка с размещением адсорбента в дополнительный чехол с различной площадью поверхности; линии – измерение влагомером; точки – расчет по предложенным методикам (погрешность не превышает 14,2 %)

Как видно из рис. 7 и рис. 8, применение предлагаемого нового способа хранения позволяет получить в принципе любое значение относительной влажности среды хранения в диапазоне, ограниченном относительной влажностью внешней среды и равновесной относительной влажностью среды внутри дополнительного чехла. Изменение относительной влажности среды хранения незначительно и находится в пределах 7 ... 10 %. Введение дополнительного диффузионного сопротивления (внутренний полимерный чехол) позволяет не только задавать значение влагосодержания среды хранения, но и увеличить в 2–2,5 раза время хранения при том же количестве адсорбента, что и при обычном способе упаковки.

7 Вопросы совершенствования и реализации сушильного оборудования для глубокой сушки гранулированных и зернистых материалов. Обследование существующего заводского оборудования на Тамбовском заводе "Электроприбор" (сушильные полочные шкафы и сушилки УСПЭ-901) выявило значительную (до 15 часов) длительность процесса глубокой сушки гранулированных полимерных материалов, существенную неоднородность конечного влагосодержания гранулята (по толщине насыпного слоя), продолжительное время прогрева слоя материала. Анализ возможных технических решений привел к выводу, что наиболее предпочтительной является конструкция двухзонной шахтной сушилки (рис. 3) с продуваемым кольцевым слоем материала при скорости потока теплоносителя, при которой массообмен происходит в отсутствие внешнедиффузионного сопротивления ($Bi_m > 100$).

С учетом особенностей производства (производительность, количество одновременно перерабатываемых полимеров, ассортимента исходных материалов) разработан и изготовлен четырехсекционный сушильный комплекс с отдельными по секциям параметрами теплоносителя. Это позволяет одновременно сушить различные партии полимеров при соответствующих требованиях регламента на процесс сушки. Основой комплекса является сушильная камера с кольцевым поперечно продуваемым слоем полимерного материала. Емкость камер различна и выбрана от 0,03 до 0,05 м³. Загрузка высушиваемых полимерных материалов производится из питающих бункеров. Каждая секция имеет отдельный калорифер (установочная мощность 3,8 кВт), что позволяет назначать необходимый для высушиваемого в данной секции материала температурный режим.

Кинетический расчет сушильного комплекса произведен по разработанной нами методике. Результаты кинетического расчета сведены в технологические таблицы оперативного контроля, позволяющие при известных текущих параметрах теплоносителя и начальном влагосодержании гранулированного ПМ определять время сушки до заданного конечного влагосодержания. Испытания изготовленного сушильного комплекса для глубокой сушки и сопоставительный анализ с существующим заводским оборудованием (полочные сушилки) показали, что:

- прогрев гранулированных ПМ в продуваемом слое происходит в 10–15 раз быстрее, чем в непродуваемом слое;
- эффективные коэффициенты диффузии влаги в ПМ, находящихся в продуваемом слое, существенно больше по сравнению с непродуваемым слоем, чем и определяется значительно меньшее время сушки в разработанном оборудовании;
- движущая сила процесса сушки в продуваемом слое больше в 2–3 раза;

– время сушки в изготовленном оборудовании в 5–7 раз меньше по сравнению с заводским оборудованием;

– дисперсия материала по конечному влагосодержанию после сушки в разработанном оборудовании существенно меньше по сравнению с существующим заводским процессом.

По заказу НП "Перколяция" (Тамбов) для предприятия "Формула" (Уфа) и Арамильского завода пластических масс (Свердловская обл.) разработаны и изготовлены сушильные установки для глубокой сушки гранулированных ПМ. Компоновка сушильных камер внутри корпуса позволяет дополнительно (при необходимости) установить в каждой секции еще по одной рабочей камере периодического действия с регулируемым объемом рабочей камеры (до 0,03 м³). Питание теплоносителем возможно общее или раздельное по секциям.

Приемные испытания показали гарантированное достижение конечного влагосодержания ($C_k = 0,1 \dots 0,15$ кг/кг) основных гранулированных ПМ (полистирол ПСВ, полистирол УПМ 0703, полиэтилен низкого давления, полиэтилен высокого давления, полипропилен, ПЭТФ, полиамид П-12 Э, полиамид 610, поликарбонат, полиамид ПА-610-А-СВ30, АВС – пластик, СФД-ВМ-ВС, сополимер МСН) за 3 ... 5 часов, что в 3–7 раз меньше, чем при существующих заводских способах сушки.

Обеспечение нормативных посевных и продовольственных качеств зерна, особенно семенного и селекционного фондов, требует совершенствования технологических режимов сушки и хранения зерновых культур. Наши исследования показали, что эффективный коэффициент диффузии влаги зависит как от сорта зерновой культуры, так и от почвенно-климатических условий произрастания. Кроме того, количественное и качественное различие эффективного коэффициента диффузии влаги в зерновых культурах обусловлено различным строением семян и их составом.

Для КФХ "Платан" (Тамбовская обл.) изготовлены мобильные зерносушилки с кольцевым плотным слоем производительностью до 1000 кг/ч, в которых организованы три последовательные, пространственно разнесенные, зоны: нагрева, сушки и охлаждения материала. Теплоноситель подается реверсивно на входе снаружи и на выходе изнутри рабочей камеры. В результате достигается более полная отработка теплоносителя и выравнивание конечного влагосодержания внешнего и внутреннего элементарных слоев зерна. Температура теплоносителя устанавливается в зависимости от поставленной задачи в пределах 40 ... 60 °С. В нижней части сушилки холодный воздух охлаждает высушенный материал до температуры среды хранения.

При обработке зерновых культур семенного фонда для ингибирования всхожести семян в верхнюю зону рекомендована подача озона (2,0 ... 6,8 мг/м²).

Испытания зерносушилки показали незначительную ($\Delta C_m \leq 0,0014$ кг/кг) неоднородность по конечному влагосодержанию зернопродуктов, возможность оперативного автоматизированного управления процессом сушки, отсутствие перегрева зерна и застойных зон в рабочей зоне аппарата, существенное уменьшение времени сушки по сравнению с традиционным способом сушки в насыпных слоях.

В ГНУ ВИИТиН использованы результаты исследований диффузионных характеристик зернопродуктов для разработки технологии, кинетического расчета и аппаратурного оформления процесса сушки зерновых культур в виброциркуляционном слое инертного зернистого теплоносителя.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Общим результатом работы являются научно обоснованные решения проблем глубокой сушки гранулированных полимерных материалов с большой величиной внутридиффузионного сопротивления и паропроницания герметичных пленочных упаковок.

При решении данных проблем получены следующие основные результаты:

Впервые проведен сопоставительный анализ сорбционных и диффузионных свойств в широком интервале температур для ПМ, находящихся в высокоэластическом и застеклованном состояниях, а также для ПМ, содержащих микропоры, на основании которого даны рекомендации по кинетическому расчету глубокой сушки. Определены температурно-концентрационные зависимости эффективного коэффициента диффузии влаги в ПМ, установившие увеличение на 1–3 порядка эффективного коэффициента диффузии с увеличением концентрации диффузанта. Температурно-влажностные зависимости эффективного коэффициента диффузии влаги аппроксимированы полуэмпирическими формулами, позво-

ляющими проводить как расчет кинетики процесса массопереноса, так и теоретический анализ диффузионных свойств. Предложен зональный метод определения зависимости эффективного коэффициента диффузии от концентрации распределяемого компонента для полидисперсных зернистых материалов.

Обоснована целесообразность двухуровневого рассмотрения кинетической задачи глубокой сушки гранулированных ПМ. На нижнем уровне рассматривается кинетика сушки единичной частицы или дифференциального слоя материала в подвижной системе координат, связанной с рассматриваемой частицей. Верхний уровень учитывает конструктивные, гидродинамические и тепломассообменные особенности выбранного типа сушильного аппарата.

Исследовано суммарное воздействие неоднородностей частиц по размерам и времени пребывания в аппарате на точность кинетического расчета, и показана необходимость учета дисперсий по размерам частиц и по времени пребывания в аппарате при определении конечного влагосодержания материала.

Проведен анализ работы существующего сушильного оборудования для проведения процесса глубокой сушки гранулированных ПМ, установлены необходимые условия для рационального проведения процесса глубокой сушки и обоснован выбор его аппаратурного оформления (аппараты шахтного типа с перекрестным движением фаз).

Исследована структура потока твердой фазы в аппаратах шахтного типа с поперечно продуваемым кольцевым слоем материала. Изучено влияние стесненности потока твердой фазы, сетчатых и перфорированных стенок на характер движения твердой фазы. Разработаны и внедрены новые конструкции сушилок шахтного типа с улучшенной структурой потока твердой фазы ($Re > 100$), разделением зон нагрева и сушки с независимыми режимными параметрами теплоносителя, обеспечивающие сокращение времени сушки в 4–5 раз по сравнению с существующим оборудованием для глубокой сушки полимерного гранулята.

Получено аналитическое решение задач теплообмена и массообмена для неподвижного плотного кольцевого слоя зернистого материала, в котором газ или жидкость движутся в радиальном направлении.

Получены аналитические решения макрокинетической задачи глубокой сушки гранулированных ПМ в аппаратах с плотным продуваемым слоем, учитывающие неоднородность частиц по размерам и по времени пребывания в аппарате на основе нормального закона распределения.

Разработаны методики проектного и технологического расчетов процесса глубокой сушки гранулированных ПМ со значительным внутридиффузионным сопротивлением, учитывающие дисперсию гранулированных материалов по размерам и реальную неоднородность по времени пребывания материала в аппарате.

Проведено исследование влажного вторичного полимерного гранулята, выявившее существенную неоднородность частиц материала по размерам и начальному влагосодержанию. Показана целесообразность применения аппаратов с активными гидродинамическими режимами (сушилки с закрученным взвешенным потоком материала) для сушки вторичного полимерного гранулята от поверхностной влаги. Разработаны новые конструкции аппаратов с закрученным взвешенным потоком материала, отличающиеся от существующих аппаратов улучшенной структурой потока твердой фазы ($Re \approx 20$) и в 1,8–2,2 раза большей удельной производительностью.

Проведено экспериментальное исследование секционированных аппаратов с закрученными взвешенными слоями материала, показавшее, что последовательное секционирование аппаратов по твердой фазе, стеснение потока твердой фазы и устранение прорыва теплоносителя позволило существенно улучшить структуру потока твердой фазы, увеличить удерживающую способность, время пребывания в аппарате, поверхность межфазного контакта и коэффициенты тепломассопереноса.

Обобщение литературных данных и собственных исследований процесса массопереноса в герметичных полимерных упаковках показало необходимость дифференцированного учета изменения кинетических коэффициентов и движущей силы при расчете процесса паропроницания.

Разработаны новый способ и конструкция пленочной упаковки для хранения продукции в условиях влажного и сухого климата при жестких требованиях к влажности внутренней среды, позволивший увеличить время хранения в 2–2,5 раза по сравнению с существующим способом. Разработаны новые методики кинетического расчета герметичных полимерных упаковок.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ПМ – полимерные материалы; ТМП – тепломассоперенос; V_n, μ_n – предэкспоненциальные множители и корни характеристических уравнений, зависящие от формы частицы; C, \bar{C} – локальное и среднее по объему частицы влагосодержание материала, кг влаги/ кг сух. мат.; кг/м^3 ; D_s – эффективный коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; F – поверхность, м^2 ; i – плотность диффузионного потока по отношению к сечению, фиксированному по твердой фазе, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; E_D – энергия активации диффузии, кДж/кмоль ; K_a – коэффициент заполнения рабочего объема аппарата; l – линейный размер, м; R – характерный размер тела (половина толщины пластины, радиус цилиндра или шара), м; R_g – универсальная газовая постоянная, кДж/кмоль ; t, T – температура, $^{\circ}\text{C}, \text{K}$; x – пространственная координата, м; ε – порозность слоя, $\text{м}^3/(\text{м}^3 \text{ слоя})$; φ – относительная влажность воздуха; τ – время, с; ρ_0 – плотность, кг/м^3 ; σ_R^2 – дисперсия частиц материала по размеру; σ_t^2 – дисперсия частиц по времени пребывания в аппарате;

$Bi_m = \beta R / (D_s A_p)$ – критерий Био массообменный;
 $Fo_m = (D_s \tau) / R^2$ – число Фурье массообменное;
 $Nu_m = (\beta R) / D$ – критерий Нуссельта массообменный;
 $Pr_m = \nu / D$ – критерий Прандтля диффузионный;
 $Re = \nu l / \nu$ – критерий Рейнольдса;
 $E = (C - C_p) / (C_n - C_p)$ – относительная концентрация.

ИНДЕКСЫ

a – адсорбент; в – внутренняя сторона; д – дополнительный; к – конечное значение; м – материал; н – начальное значение; нас – насыщенный; н – наружная сторона; ос – основной; р – равновесное значение; с – среда; т – твердая фаза.

Основные материалы, отражающие результаты диссертационной работы, изложены в следующих публикациях:

1 Рудобашта С.П. Тепломассообмен в аппарате с кольцевым слоем зернистого материала / С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, Э.М. Карташов // Теор. основы хим. технол. 2002. Т. 36. № 5. С. 1–6.

2 *Mathematical modeling and apparatus of deep drying process disperse polymers* / S.P. Rudobashta, V.M. Dmitriev, G.S. Kormiltsin, L.Ya. Rudobashta // *Drying Technology – An international Journal*. Neu York, Dekker. 1998. Vol. 16. N 7. P. 1471–1485.

3 *Optimal designing of the process and apparatus with flowing streams for the granular materials drying* 11-th International Drying Symposium (IDS-98) / S.I. Dvo-retsky, V.M. Dmitriev, G.S. Kormiltsin, A.V. Klimchikov. Halkidiki, Greece. 1998. Vol. A. P. 464–471.

4 Рудобашта С.П. Аналитический расчет процесса глубокой сушки гранулированных полимерных материалов в шахтных сушилках / С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, А.Н. Плановский // Хим. и нефтяное машиностроение. 1979. № 4. С. 14–16.

5 Рудобашта С.П. Исследование паропроницаемости полимерных мембран / С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, А.Н. Плановский // Высокомолекулярные соединения. 1978. Т(А)XX. № 3. С. 572–578.

6 *Зональный метод определения зависимости коэффициента массопроводности от концентрации* / Э.Н. Очев, С.П. Рудобашта, А.Н. Плановский, В.М. Дмитриев // Теор. основы хим. технол. 1975. Т. 9. № 4. С. 491–495.

- 7 *Кинетические* закономерности процесса сушки латексных пленок / С.П. Ру-добашта, В.М. Дмитриев, М.В. Несмеянов, Л.П. Медведева // Каучук и резина. 1977. № 1. С. 11–13.
- 8 *Дмитриев В.М.* Кинетика нагрева непористых полимерных материалов при сушке / В.М. Дмитриев, С.П. Рудобашта // Производство и переработка пластических масс. 1978. № 4. С. 15–17.
- 9 *Исследование* внутреннего массопереноса при сушке некоторых полимерных материалов / С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, А.Н. Плановский, Л.Ф. Шибаева // Производство и переработка пластических масс. 1977. № 6. С. 15–19.
- 10 *Рудобашта С.П.* Исследование массопроводности некоторых полимерных материалов / С.П. Рудобашта, А.Н. Плановский, В.М. Дмитриев // Труды МИХМа. 1976. Вып. 69. С. 39–41.
- 11 *Влияние* структурных и сорбционных характеристик на кинетику процесса сушки волокнообразующих полимеров / М.К. Кошелева, В.М. Дмитриев, М.Г. Крохин, Г.Д. Кавецкий, Л.Ф. Шибаева // Производство и переработка пластических масс. 1975. № 8. С. 14–16.
- 12 *Изотермическая* модель динамики адсорбции паров бензина в слое активного угля / А.А. Уколов, С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, М.Е. Уланов // Гидродинамика, тепло- и массообмен в зернистых средах. Иваново, 1983. С. 96–99.
- 13 *Установка* для определения коэффициентов диффузии влаги в зернистых материалах / В.М. Дмитриев, Г.С. Кормильцин, С.П. Рудобашта, А.М. Воробьев // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 6. Вып. 4. С. 424–428.
- 14 *Исследование* кинетики сушки зерновых культур / С.И. Дворецкий, В.М. Дмитриев, Г.С. Кормильцин, С.И. Пестрецов, А.А. Ермаков // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8. № 2. С. 228–229.
- 15 *Обобщенные* зависимости для определения коэффициента диффузии в твердых телах / Ю.А. Тепляков, В.М. Дмитриев, В.М. Нечаев, А.М. Климов, Э.Н. Очнев // Вестник ТГТУ. 1999. Т. 4. Вып. 3. С. 385–387.
- 16 *Дмитриев В.М.* Способ упаковывания влагочувствительных изделий в герметичную пленочную оболочку / В.М. Дмитриев, Г.С. Кормильцин, Л.Я. Рудобашта // Вестник ТГТУ. 1996. Т. 2. № 1–2. С. 62–66.
- 17 *Исследование* интенсивности продольного перемешивания газовой фазы в аппарате с активным гидродинамическим режимом / Г.С. Кормильцин, А.М. Воробьев, В.М. Дмитриев, А.А. Горелов // Вестник ТГТУ. 1997. Т. 2. Вып. 2. С. 232.
- 18 *Конструктивное* оформление, расчет и интенсификация процесса сушки зернопродуктов с/х производства / Л.Я. Рудобашта, С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, Е.Л. Бабичева // Высокоэффективные электротехнологии и биоинформационные системы АПК: Сб. ст. Всерос. семинара. М., 1997. С. 36–38.
- 19 *Разработка* теоретических основ расчета и конструирования энерго- и ресурсосберегающего оборудования многоассортиментных химических и микробиологических производств / С.И. Дворецкий, Г.С. Кормильцин, В.М. Дмитриев, В.Н. Долгунин, О.В. Зюзина, А.И. Леонтьева // Труды ТГТУ. 1998. Ч. 1. С. 14–25.
- 20 *Исследование* аппарата с закрученным псевдооживленным слоем инертного материала / Г.С. Кормильцин, С.П. Рудобашта, А.М. Воробьев, В.М. Дмитриев // Химия и химическая технология. Известия вузов. 1988. № 12. С. 123–125.
- 21 *Сушильные* аппараты с активным гидродинамическим режимом / В.М. Дмитриев, Г.С. Кормильцин, С.П. Рудобашта, А.М. Воробьев, А.А. Горелов // Вестник ТГТУ. 2001. Т. 6. Вып. 2. С. 415–418.
- 22 *Дмитриев В.М.* Исследование массопроводности полимерных материалов в стационарных и нестационарных условиях / В.М. Дмитриев, А.М. Климов // Труды МИХМа. М., 1975. Вып. 68. С. 28–30.
- 23 *Исследование* температуропроводности химикатов-добавок к полимерным материалам / С.П. Рудобашта, Г.С. Кормильцин, В.М. Дмитриев, В.А. Свиарев // Массообменные процессы химической технологии / РЖ ВИНТИ. 1980. № 2/100/, № 566–21. С. 87.

24 *Дмитриев В.М.* Расчет шахтных сушилок для гранулированных материалов / В.М. Дмитриев // Сушка и грануляция продуктов микробиологического и тонкого химического синтеза / ОНИИТЭХим. Черкассы, 1982. Ч. II. С. 54–57 (№ 768хп–Д82).

25 *Тарова Л.С.* Исследование структурно-сорбционных свойств и закономерностей переноса влаги в гранулированных полимерных материалах / Л.С. Тарова, В.М. Дмитриев // Деп. науч. работы / ОНИИТЭХим. Черкассы, 1985. № 8. С. 161. (№ 513хп–85 Деп).

26 *Дмитриев В.М.* Экспериментальная установка для определения массопроводных свойств влажных материалов / В.М. Дмитриев, Л.С. Тарова, А.В. Бояршинов // Деп. науч. работы / ОНИИТЭХим. Черкассы, 1986. № 2. С. 150. (№ 1027хп–85 Деп).

27 *Дмитриев В.М.* Экспериментальное исследование равновесных и кинетических особенностей процессов адсорбции паров бензина / В.М. Дмитриев, Л.С. Тарова, А.А. Уколов // Деп. науч. работы / ОНИИТЭХим. Черкассы, 1985. № 8. С. 161. (№ 513х–85 Деп).

28 *Дмитриев В.М.* Математическое моделирование динамики адсорбции в неподвижном слое адсорбента / В.М. Дмитриев, Л.С. Тарова, А.А. Уколов // Деп. науч. работы / ОНИИТЭХим. Черкассы, 1986. № 8. С. 94. (№ 565–хп).

29 *Дмитриев В.М.* Расчет процесса адсорбции при очистке сточных вод производства химикатов-добавок для полимерных материалов / В.М. Дмитриев, Л.С. Тарова, Г.С. Кормильцин // ОНИИТЭХим. Черкассы, 1986. № 11. С. 155. (№ 832хп–87).

30 *Дмитриев В.М.* Расчет процесса сушки гранулированных полимерных материалов в полочных сушилках / В.М. Дмитриев, Л.С. Тарова, Г.С. Кормильцин // ОНИИТЭХим. Черкассы, 1987. № 11. С. 155. (№ 831хп–87).

31 *Дмитриев В.М.* Определение коэффициента внутренней диффузии при сорбции ионов меди волокнистыми ионитами / В.М. Дмитриев, Л.С. Тарова, Г.С. Кормильцин / ОНИИТЭХим. // Черкассы, 1989. № 7. С. 137. (№ 244–хп89).

32 *Исследование* гидродинамики фонтанирующего слоя в сушилке для растворов, суспензий и пастообразных материалов / Г.С. Кормильцин, А.М. Воробьев, А.А. Горелов, В.М. Дмитриев // ВИНТИ. 1997. № 7. С. 276. (№ 1692–В97).

33 *Mathematical modeling and apparatus arrangements of deep drying process disperse polymers* 12-th International Congress of Chemical and Process Engineering / S.P. Rudobashta, V.M. Dmitriev, G.S. Kormiltsin, L.Ya Rudobashta // CHISA-96, Praha, Czech Republik, August, 1996. Heat Transfer Processes and Equipment Drying and Fool Engineering.

34 *Рудобашта С.П.* Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление конвективной сушки дисперсных материалов / С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов): Тез. докл. международ. конф. СЭТТ-2002. Москва, 2002. Т. 2. С. 17–27.

35 *Дворецкий С.И.* Аппаратурное оформление процесса конвективной сушки дисперсных материалов с высоким внутридиффузионным сопротивлением / С.И. Дворецкий, В.М. Дмитриев, С.И. Пестрецов // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов): Докл. международ. конф. СЭТТ-2002. М., 2002. Т. 2. С. 83–88.

36 *Дмитриев В.М.* Массопроводные свойства влажных материалов и оптимальное проектирование процессов сушки / В.М. Дмитриев, Г.С. Кормильцин, А.М. Воробьев // Математические методы в технике и технологии: Докл. международ. конф. ММТТ-15. Тамбов, 2002.

37 *Дмитриев В.М.* Обобщенные зависимости для определения коэффициента диффузии в твердых телах / В.М. Дмитриев, Ю.А. Тепляков, В.М. Нечаев // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. 4-й Междунар. теплофиз. шк. Тамбов, 2001. Ч. 2. С. 125.

38 *Установка для определения коэффициентов диффузии влаги в зернистых материалах / В.М. Дмитриев, Г.С. Кормильцин, А.М. Воробьев, С.П. Рудобашта // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. 4-й Междунар. теплофиз. шк. Тамбов, 2001. Ч. 2. С. 128.*

39 *Дворецкий С.И. Исследование и моделирование кинетики сушки дисперсных материалов с высоким внутридиффузионным сопротивлением / С.И. Дворецкий, В.М. Дмитриев, С.И. Пестрецов // Тез. докл. 4-й Междунар. теплофиз. шк. Тамбов, 2001. Ч. 2. С. 126.*

40 *Рудобашта Л.Я. Кинетический расчет и аппаратное оформление процесса глубокой сушки гранулированных полимеров / Л.Я. Рудобашта, С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев // Научные чтения: Тез. докл. / МГУПБ. М., 1997.*

41 *Дмитриев В.М. Разработка сушильных шахтных аппаратов с кольцевым слоем зернистого материала / В.М. Дмитриев, Г.С. Кормильцин, С.И. Пестрецов // Прогрессивные технологии и оборудование для пищевой промышленности: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 1997. С. 220–222.*

42 *Дмитриев В.М. Аппараты с активным гидродинамическим режимом для сушки суспензий и пастообразных материалов / В.М. Дмитриев, Г.С. Кормильцин, А.В. Климович // Прогрессивные технологии и оборудование для пищевой промышленности: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 1997. С. 218–220.*

43 *Дмитриев В.М. Глубокая сушка гранулированных полимерных материалов / В.М. Дмитриев, Г.С. Кормильцин, С.И. Дворецкий // Тез. докл. 2-й региональной науч.-техн. конф. Тамбов, 1994. С. 111.*

44 *Разработка технологических процессов и оборудования гибких автоматизированных производственных систем / С.И. Дворецкий, Г.С. Кормильцин, В.М. Дмитриев, В.Н. Долгунин // Проблемы химии и химической технологии Центрального Черноземья Российской Федерации: Тез. докл. 1-й региональной науч.-техн. конф. Липецк, 1993. С. 92–95.*

45 *Автоматизированная установка для исследования диффузии влаги в сыпучих материалах / П.С. Беляев, В.М. Дмитриев, Г.Ю. Петров, А.П. Рыжов // Теплофизические проблемы промышленного производства: Тез. докл. Междунар. теплофиз. шк. Тамбов, 1992. С. 129.*

46 *Дмитриев В.М. Исследование тепломассообменных характеристик полимерных материалов / В.М. Дмитриев, Л.Я. Рудобашта // Теплофизические проблемы промышленного производства: Тез. докл. Междунар. теплофиз. шк. Тамбов, 1992. С. 116.*

47 *Сушильный аппарат для микробиологических продуктов / С.П. Рудобашта, Г.С. Кормильцин, А.М. Воробьев, В.М. Дмитриев, А.В. Бобков // Процессы и аппараты для микробиологических производств. "БИОТЕХНИКА-89": Тез. докл. Всесоюзн. конф. Грозный, 1989. Ч. II. С. 26.*

48 *Исследование гидродинамики сушилки с закрученным слоем инертного носителя / С.П. Рудобашта, Г.С. Кормильцин, А.М. Воробьев, В.М. Дмитриев // Современные машины и аппараты химических производств: Тез. докл. Всесоюзн. конф. Чимкент, 1988. Т. 3. С. 22–23.*

49 *Сушилка с закрученным потоком инертного носителя / С.П. Рудобашта, Г.С. Кормильцин, А.М. Воробьев, В.М. Дмитриев // Процессы и аппараты для микробиологических производств: Тез. докл. Всесоюзн. конф. Грозный, 1986. С. 95–97.*

50 *Уколов А.А. Исследование процесса сушки гранулированных материалов методом математического моделирования / А.А. Уколов, В.Н. Долгунин, В.М. Дмитриев // Процессы и оборудование для гранулирования продуктов микробиологического синтеза: Тез. докл. Всесоюзн. конф. Тамбов, 1984. С. 66.*

51 *Исследование свойств химикатов-добавок для полимерных материалов как объектов сушки / С.П. Рудобашта, Г.С. Кормильцин, В.М. Дмитриев, В.В. Давитулиани, В.Н. Долгунин // Синтез и исследование эффективности химикатов для полимерных материалов: Тез. докл. 7-й Всесоюзн. науч.-техн. конф. / НИИХИМПОЛИМЕР. Тамбов, 1982.*

52 *Дмитриев В.М. Расчет шахтных сушилок для гранулированных материалов / В.М. Дмитриев. Сушка и грануляция продуктов микробиологического и тонкого химического синтеза: Тез. докл. респ. конф. / ТИХМ. Тамбов, 1981. С. 66–67.*

53 *Рудобашта С.П.* Исследование кинетики и статики сушки некоторых полимерных материалов / С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, А.М. Климов // Процессы и аппараты производства полимерных материалов, методы и оборудование для переработки их в изделия: Тез. докл. Всесоюзн. конф. / МИХМ. М., 1977. С. 92.

54 *Рудобашта С.П.* Исследование кинетики сушки полимерных материалов с большой величиной внутридиффузионного сопротивления / С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, А.Н. Плановский // Теоретические основы химической технологии. 1977. № 2. Т.11.

55 *Рудобашта С.П.* Исследование процесса сушки термопластичных гранулированных и листовых материалов / С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев, А.М. Климов // Процессы и аппараты производства полимерных материалов, методы и оборудование для переработки их в изделия: Тез. докл. респ. конф. / ТИХМ. Тамбов, 1974. С. 160–161.

56–70. *Авторские свидетельства СССР и патенты РФ: №№: 1366825, 1383067, 1411219, 1416828, 1451664, 1586771, 1592688, 1603163, 1666889, 1688082, 1695088, 1778478, 1698601, 1760836, 2171958.*