

Л87

P-P

368/-

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР  
КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. А. М. ГОРЬКОГО

---

П. П. ЛУЦИК

**ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ  
И ФОРМ СВЯЗИ ВЛАГИ НА КИНЕТИКУ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ  
ПОЛЕЙ В ДИСПЕРСНЫХ ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ**

Молекулярная физика. 054

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Научный руководитель — доктор технических наук,  
профессор **М. Ф. КАЗАНСКИЙ**

КИЕВ — 1967

НБ НПУ  
імені М.П. Драгоманова



100313401

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР  
КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. А. М. ГОРЬКОГО

---

П. П. ЛУЦИК

53  
Луц  
*На правах рукописи*

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ  
И ФОРМ СВЯЗИ ВЛАГИ НА КИНЕТИКУ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ  
ПОЛЕЙ В ДИСПЕРСНЫХ ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ

Молекулярная физика. 054

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель — доктор технических наук,  
профессор М. Ф. КАЗАНСКИЙ

КИЕВ — 1967

*Киевский государственный педагогический институт  
им. А. М. Горького, Киев, Бульвар Шевченко, 22/24*

Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации ЛУЦИКА П. П., представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Работа выполнена на кафедрах физики Киевского технологического института легкой промышленности и Киевского государственного педагогического института им. А. М. Горького.

Решением Ученого Совета Киевского государственного педагогического института им. А. М. Горького официальными оппонентами утверждены:

1. Доктор технических наук, профессор Ю. А. МИХАЙЛОВ.
2. Кандидат физико-математических наук, доцент М. В. ВЕНЕДИКТОВ.

Автореферат разослан « . . . » . . . . . 1967 г.

Защита диссертации состоится « . . . » . . . . . 1967 г. в Киевском государственном педагогическом институте им. А. М. Горького (**Киев, Бульвар Шевченко, 22/24**).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института ежедневно с 10.00 до 15.00 часов, кроме воскресенья.

*Ученый секретарь*

Перенос тепла и влаги в дисперсных пористых телах при наличии фазовых превращений (например, при сушке) представляет сложный комплекс взаимосвязанных процессов, в результате которых в теле возникают нестационарные поля влагосодержания и температуры — гидротермические поля. Характер гидротермических полей в дисперсных телах зависит как от пористой структуры тела и форм связи и состояния поглощенной им влаги, так и от условий сопряжения дисперсной системы с окружающей средой. Кинетика нестационарных гидротермических полей в теле определяется механизмом переноса тепла и влаги. Поэтому путем изучения зависимости кинетики внутреннего тепло- и массопереноса от структуры и водоудерживающих свойств тела можно выяснить молекулярно-физический механизм процессов переноса.

Полученные при этом результаты могут быть использованы для дальнейшего развития молекулярной физики и термодинамики дисперсных тел. Кроме того, исследование внутреннего тепло- и массопереноса, коллоидно-физических и водоудерживающих свойств дисперсных тел в последнее время становится особенно актуальным в связи с дальнейшей интенсификацией процессов сушки и увлажнения дисперсных материалов в различных отраслях народного хозяйства.

Таким образом, определение нестационарных гидротермических полей в дисперсных телах при сушке и исследование зависимости кинетики этих полей от пористой структуры тела и форм связи с ним поглощенной влаги представляет большой научный и практический интерес.

Тем не менее, исследование кинетики гидротермических полей в дисперсных телах до сих пор не получило надлежащего освещения в научной литературе из-за экспериментальных трудностей определения поля влагосодержания тела в процессе сушки без нарушения целостности его структуры.

Исходя из этого, перед данной диссертационной работой нами были поставлены следующие задачи:

1. Разработать метод, пригодный для экспериментального определения локального влагосодержания в дисперсных телах

в условиях непрерывного изменения влагосодержания их при сушке от полной влагоемкости до сухого состояния тела.

2. Определить гидротермические поля в типичных капиллярнопористых и коллоидных капиллярнопористых телах различной физико-химической природы и разной пористой структуры в процессе их конвективной сушки.

3. Исследовать зависимость кинетики гидротермических полей от пористой структуры тела и форм связи с ним поглощенной влаги.

Диссертация состоит из **введения, пяти глав и общих выводов**, изложенных на 169 страницах. Кроме того, работа содержит **список цитированной литературы** (242 названия, из них 12 работ автора), **58 рисунков и приложения таблиц экспериментальных данных**.

## I

В **первой главе** работы по литературным данным рассмотрены основные свойства влажных дисперсных тел, экспериментальные методы исследования их пористой структуры, основные законы переноса тепла и влаги в дисперсных пористых телах, а также процессы конвективного тепло- и массообмена влажного дисперсного тела с окружающей средой.

В реферируемой работе мы придерживались общепринятого в теплофизике (А. В. Лыков) деления дисперсных тел по их коллоидно-физическим свойствам на три группы: капиллярнопористые, коллоидные и коллоидные капиллярнопористые.

Влажные тела представляют собой сложные дисперсные системы, пористая структура которых определяется степенью дисперсности и взаимным расположением отдельных частиц тела. Обычно пористую структуру характеризуют общей пористостью, удельной поверхностью, размерами пор, интегральной и дифференциальной функциями распределения пор по размерам и рядом других величин. Многочисленность характеристик пористой структуры и методов их определения обусловлена сложностью конфигурации системы пор и трудностями, возникающими при ее изучении.

В первой главе диссертации дан критический анализ различных методов определения пористой структуры дисперсных тел. Здесь же описана разработанная автором лабораторная установка для определения кривых распределения в теле пор по их размерам на базе усовершенствованной нами методики, предложенной ранее А. В. Думанским и М. С. Остриковым. Распределение влагосодержания по высоте колонки исследуе-

мого образца в предлагаемом приборе определяется путем просвечивания тонких слоев образца узким пучком гамма-лучей, вместо разрезания его на части и последующего высушивания проб. Это дало возможность точнее определить влаго-содержание и, следовательно, интегральную кривую распределения пор по размерам. В свою очередь, дискретное дифференцирование (по К. Ланцошу) кривых интегрального распределения позволило значительно повысить точность определения дифференциальной характеристики пористой структуры выбранных нами для исследования тел.

В этой главе диссертации приведен также обзор работ о формах связи влаги с твердой фазой дисперсного тела и ее состояниях в порах. При этом в качестве основной была принята классификация форм связи влаги с дисперсными телами по П. А. Ребиндеру, в основу которой положен термодинамический критерий оценки водоудерживающих свойств тела по величине энергии связи влаги с твердой фазой тела. Согласно этой классификации все формы связи влаги с дисперсными телами делятся на три категории: химическая связь, физико-химическая и физико-механическая связь. В работе рассмотрен механизм взаимодействия молекул воды с твердой фазой тела при всех основных формах связи и различных состояниях ее в теле.

Как следует из работ Б. В. Дерягина, А. В. Лыкова, П. И. Андрианова, Ю. Л. Кавказова, Н. В. Чураева и других исследователей, физико-химические, теплофизические, а также технологические свойства влажного дисперсного тела в значительной степени зависят от формы связи и состояния в порах поглощенной телом влаги. В связи с этим для исследования кинетики гидротермических полей существенную роль приобретают методы определения форм связи влаги и ее состояния в порах дисперсного тела.

Для определения дифференциальных водоудерживающих свойств дисперсных материалов по отношению к влаге разных форм и видов связи с ними был выбран метод термограмм сушки тонких образцов дисперсных тел, разработанный М. Ф. Казанским. По сравнению с другими лабораторными методами определения водоудерживающих свойств дисперсных тел метод термограмм сушки имеет ряд преимуществ. Основанный на законе последовательного удаления влаги разных форм и видов связи с дисперсным телом, этот метод является единственным кинетическим методом, позволяющим с достаточной точностью из одного опыта определить все формы связи влаги и ее состояния в порах тела.

Нами проведено дальнейшее развитие метода термограмм сушки, позволившее в грубодисперсных телах определить границы водопоглощающих свойств их по отношению к влаге различного положения в порах — влаге капиллярного состояния, пленочно-менисковой и менисковой. Для этого термограммы пришлось записывать, пользуясь специально разработанными кюветами, обеспечивающими сушку испытуемого образца пористого тела в условиях, близких к адиабатическим внутри тела. Дополнительные сингулярные точки на термограммах наблюдаются тем более четко, чем ближе к адиабатическим оказываются условия внутри образца в процессе опыта. Эти условия были определены экспериментально путем подбора материала для изготовления кюветы и ее деталей.

Лабораторная установка и условия, при которых проводилась запись термограмм, ранее описаны М. Ф. Казанским. Исключение составляли лишь конструкция кюветы для образца и расположение в нем датчика температуры. Кювета изготовлена в виде цельного цилиндрического сосуда с днищем из фторопласта, обладающего низкой теплопроводностью. Датчик температуры (термометр сопротивления) помещался на дно кюветы с внутренней стороны, куда засыпалось исследуемое сыпучее тело толщиной слоя 10 мм.

Таким образом для всех образцов различных капиллярно-пористых тел, подобранных нами для определения гидротермических полей, были определены дифференциальные влагосодержания, соответствующие не только различным формам связи влаги, но и различным состояниям ее в порах. Полученные нами результаты определений для кварцевого песка и силикагеля сравнительно хорошо совпадают с имеющимися в литературе данными других авторов (А. А. Роде, Н. А. Цытович, М. В. Венедиктов, Е. М. Сергеев и др.), полученными другими взаимно независимыми методами.

В работе по литературным источникам рассмотрены основные законы потенциальной теории внутреннего тепло- и массопереноса, созданной трудами А. В. Лыкова и Ю. А. Михайлова на основе термодинамики необратимых процессов.

Проведен обзор литературных данных о механизме конвективного тепло- и массообмена влажного дисперсного тела с окружающей средой. Как известно, процесс тепло- и массообмена протекает в двойном пограничном слое. Одна часть пограничного слоя находится в окружающей среде непосредственно у поверхности тела, вторая охватывает ближайшую к поверхности часть дисперсного тела. Существование двойного пограничного слоя свидетельствует о единстве и неразрывной

связи процессов внутреннего и внешнего тепло- и массопереноса, а также подтверждает условный характер деления единого процесса на две отдельные задачи — внутреннюю и внешнюю.

## II

**Вторая глава** посвящена численному решению системы дифференциальных уравнений молекулярно-молярного тепло- и массопереноса в теле при конвективной сушке, полученному автором методом матричной факторизации.

Аналитические решения полной системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса для конвективной сушки получены и проанализированы в монографиях А. В. Лыкова и Ю. М. Михайлова. Однако точное решение этих уравнений при граничных условиях третьего рода, описывающих конвективный тепло- и массообмен, очень громоздко, а потому мало пригодно для практических расчетов. Расчет тепло- и массообменных процессов крайне необходим для правильного проектирования и выбора оптимальных режимов гидротермической обработки (в частности сушки) влажных материалов в промышленности и сельском хозяйстве.

Успешное применение численных методов решения, с использованием простых и легко осуществимых вычислений, позволило приблизить решения многих задач к запросам практики. Среди приближенных методов решения задач тепло- и массопереноса наибольшее распространение получил метод конечных разностей. В настоящее время эффективность использования численных методов возросла во много раз в связи с применением электронных вычислительных машин.

Для численного решения полной системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса при граничных условиях, удовлетворяющих процессу конвективной сушки, нами был использован аппарат матричной факторизации, разработанный И. М. Гельфандом, М. В. Келдышем и О. В. Локуциевским. Окончательное решение этой краевой задачи получено в виде простого алгоритма, состоящего из трех векторно-матричных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} v_{i+1} &= C_{i+1} (B_i - v_i)^{-1} \\ \bar{Z}_{i+1} &= v_{i+1} (\bar{Z}_i + \bar{V}_i) \\ T_i &= (B_i - v_i)^{-1} (\bar{T}_{i+1} + \bar{Z}_i + \bar{V}_i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



Первые два уравнения определяют вспомогательные совокупности матриц  $v_i$  и векторов  $\bar{Z}_i$ , а третье уравнение — вектор-функцию  $\bar{T}_i$ , компонентами которой являются искомые потенциалы переноса тепла и массы (температура, потенциал массопереноса, общее давление паровоздушной смеси). Индекс « $i$ » означает номер узла пространственной координаты прямоугольной пространственно-временной сетки в данный момент времени. Элементы матриц  $B_i$  и  $C_i$  содержат физические характеристики внутреннего и внешнего тепло- и массопереноса, а компоненты вектора  $\bar{V}_i$ , кроме того, определяются значениями потенциалов тепло- и массопереноса в предыдущий момент времени.

Вычисление по схеме (1) ведется для каждого момента времени в два «хода» вдоль пространственной координаты. Используя условия для определения начальных значений матрицы  $v_1$  и вектора  $\bar{Z}_1$ , с помощью первых двух уравнений системы (1) определяются в «прямом направлении» две последовательности величин: матриц  $v_1, v_2, \dots, v_n$  и векторов  $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \dots, \bar{Z}_n$ . Затем, располагая вспомогательными величинами  $v_i$  и  $\bar{Z}_i$  и условием для определения начального значения  $\bar{T}_{n+1}$ , при помощи третьего уравнения системы (1) в «обратном направлении» вычисляются значения искомой вектор-функции  $\bar{T}_{n+1}, \bar{T}_n, \dots, \bar{T}_1$ .

Таким образом, начиная расчет от начального момента времени, для которого известно распределение потенциалов тепло- и массопереноса, можно последовательно, шаг за шагом, рассчитать нестационарные поля температуры, потенциала массопереноса и общего давления в дисперсном теле при сушке.

Факторизованная система (1) разностных уравнений тепло- и массопереноса является удобным, логически простым алгоритмом при составлении программы для вычислительных машин, т. к. требует циклического повторения одинаковых вычислительных операций.

Однако современное состояние исследований внутреннего и внешнего тепло- и массопереноса, к сожалению, не позволяет произвести численный расчет полей температуры и влагосодержания в дисперсном теле при конвективной сушке, т. к. имеющиеся в литературе данные разных авторов о коэффициентах внутреннего и особенно внешнего тепло- и массообмена носят отрывочный, иногда противоречивый характер.

Исходя из этого, в данной диссертационной работе основное внимание было уделено экспериментальному изучению гидротермических полей в типичных дисперсных телах в процессе их конвективной сушки.

### III

Кроме краткого обзора литературы об экспериментальном исследовании полей влагосодержания и температуры в дисперсных телах, третья глава диссертации содержит:

а) описание разработанной автором лабораторной установки для определения нестационарных гидротермических полей в дисперсных телах при конвективной сушке;

б) исследование оптимальных условий применения метода гаммаскопии для определения локального влагосодержания в дисперсном теле в широком интервале — от полной влагоемкости до сухого состояния тела.

Лабораторная установка состоит из блока гаммаскопии для измерения влагосодержания в слоях дисперсного тела, блока измерения и автоматической записи температуры в тех же слоях тела, аэродинамической трубы с камерой для сушки исследуемых образцов, блока нагревания и автоматического регулирования заданной температуры воздуха в сушильной камере, блока обеспечения циркуляции воздуха в аэродинамической трубе с заданной постоянной скоростью, устройства для перемещения образца перед щелью коллиматора и измерения координаты просвечиваемого слоя.

Наибольшие затруднения при исследовании гидротермических полей в дисперсных телах вызывает определение поля влагосодержания в теле без нарушения его пористой структуры в процессе сушки. Основной причиной этих затруднений является отсутствие в настоящее время надежного метода измерения локального влагосодержания. На основе анализа достоинств и недостатков различных методов, описанных в литературе, было установлено, что для определения кинетики поля влагосодержания в дисперсном теле при сушке наиболее пригодным является метод гаммаскопии.

Нами проведено дальнейшее развитие метода гаммаскопии, основанного на законе ослабления пучка гамма-лучей влажным поглотителем. Получено выражение, определяющее чувствительность измерения влагосодержания тела путем просвечивания его узким пучком гамма-лучей:

$$G = -I \alpha \gamma_0 x,$$

где  $G$  — чувствительность измерения локального влагосодержания тела;

$I$  — интенсивность узкого пучка гамма-лучей, прошедших через слой влажного поглотителя;

$\alpha$  — массовый коэффициент ослабления пучка гамма-лучей влажным дисперсным телом;

$x$  — толщина просвечиваемого слоя;

$\gamma_0$  — плотность сухого дисперсного тела.

В работе показано, что с увеличением энергии гамма-квантов чувствительность метода гаммаскопии убывает, а кривая зависимости чувствительности от произведения  $\gamma_0 x$  при постоянной энергии  $\gamma$ -квантов имеет максимум. Последняя зависимость свидетельствует о существовании при постоянной энергии  $\gamma$ -квантов оптимальных значений толщины просвечиваемых дисперсных тел с различными плотностями. По кривой  $G(\gamma_0 x)$  было получено условие для определения толщины просвечиваемого дисперсного тела, удовлетворяющей максимальной чувствительности измерения влагосодержания при помощи гаммаскопии.

Дан подробный анализ источников погрешностей, возникающих при измерении влагосодержания рассматриваемым методом и получены выражения для относительной и абсолютной погрешностей определения влагосодержания.

При проектировании блока гаммаскопии возникает вопрос о связи между абсолютной погрешностью измерения влагосодержания и активностью источника гамма-излучения, необходимой для обеспечения заданной погрешности. Нами был найден общий вид этого соотношения, в которое входят также и другие характеристики источника излучения и геометрические параметры схемы просвечивания:

$$A = \frac{1,7 \cdot 10^{-7} r^2}{q \varepsilon \cdot \Delta \tau \cdot \Delta S} \cdot \frac{(1 + \eta)}{\Delta u \cdot \alpha \cdot \gamma_0 \cdot x} \left[ \frac{1 + \eta}{\Delta \tilde{u} \gamma_0 \alpha x} + \sqrt{\left( \frac{1 + \eta}{\Delta u \alpha \gamma_0 x} \right)^2 + 4 \cdot \Delta I_{an}^2} \right],$$

где

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{2} f^{-1} e^{\alpha \gamma_0 x (1+u)} [f^{-1} e^{\alpha \gamma_0 x (1+u)} + 1]};$$

$A$  — активность источника  $\gamma$ -излучения в мкюри;

$u$  — влагосодержание тела;

- $\Delta u$  — абсолютная погрешность влагосодержания;  
 $\Delta I_{an}$  — абсолютная погрешность измерения интенсивности  $\gamma$ -квантов, вносимая измерительной аппаратурой;  
 $q$  — число  $\gamma$ -квантов на один акт распада ядра;  
 $\varepsilon$  — эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов;  
 $r$  — расстояние от источника излучения до детектора;  
 $\Delta S$  — площадь детектора, облучаемая  $\gamma$ -квантами;  
 $\Delta \tau$  — время просвечивания тела  $\gamma$ -лучами;  
 $f$  — коэффициент, определяющий дополнительное ослабление узкого пучка стенками устройства.

Для обеспечения оптимальных условий применения метода гаммаскопии необходимо правильно выбрать радиоактивный изотоп, служащий источником  $\gamma$ -излучения. Среди требований, рассмотренных в данной работе и предъявляемых к источнику, наиболее важным является подбор источника по энергии  $\gamma$ -излучения. Гамма-кванты должны быть достаточно жесткими, чтобы обеспечивать просвечивание влажных материалов заданной толщины, и, с другой стороны, должны обеспечить достаточную чувствительность и точность измерения влагосодержания.

Нами была изучена зависимость абсолютной погрешности влагосодержания тела от энергии  $\gamma$ -квантов. По полученному соотношению построена кривая  $\Delta u(E)$ , на которой имеется минимум при  $E = 0,8$  Мэв. В области минимума этой кривой в интервале значений энергий от 0,4 до 1,3 Мэв погрешность влагосодержания очень слабо зависит от энергии  $\gamma$ -квантов. Этот факт позволяет применять  $\gamma$ -источники в более широком диапазоне значений энергии  $\gamma$ -излучения.

Совместный анализ кривых чувствительности и точности приводит к выводу, что в качестве источника излучения целесообразно взять кобальт-60 (средняя энергия 1,25 Мэв). Использование относительно высокой энергии  $\gamma$ -квантов, излучаемых кобальтом-60, позволяет с большей точностью выполнить усреднение массовых коэффициентов легких элементов при комптон-эффекте. Кроме того, как показано В. А. Арцыбашевым, кобальт в сочетании с острой коллимацией пучка  $\gamma$ -лучей обеспечивает сравнительно высокую точность выделения первичного  $\gamma$ -излучения. При этом небольшую роль играет поправка на неполную коллимацию, что особенно важно при просвечивании тел, состоящих из смеси химических элементов.

В работе дана характеристика основных узлов детектора  $\gamma$ -излучения, в качестве которого был использован сцинтилляционный счетчик, обладающий большим быстродействием и

высокой эффективностью счета  $\gamma$ -квантов. Приведена схема просвечивания исследуемых образцов дисперсных тел с указанием значений основных ее геометрических параметров.

#### IV

В четвертой главе диссертации дано описание выбранных для исследования образцов типичных дисперсных тел, приведены их структурные характеристики и дифференциальные водоудерживающие свойства. Изложены результаты определения кинетики гидротермических полей в дисперсных телах в процессе их конвективной сушки и исследована зависимость кинетики этих полей от пористой структуры и форм связи поглощенной влаги.

Среди множества разнообразных дисперсных тел необходимо было отобрать небольшое количество образцов, которые по пористой структуре, коллоидно-физическим и водоудерживающим свойствам были бы типичны для основных групп дисперсных пористых тел.

Образцом грубодисперсного тела служил кварцевый песок (размер зерен 0,5—0,75 мм). В макропорах межзернового пространства песок может удерживать воду в трех различных состояниях — капиллярном, пленочно-менисковом и менисковом.

В качестве типичного капиллярнопористого тела с жесткой пористой структурой был выбран силикагель МСМ, размер зерен которого составлял 0,5—0,75 мм. Силикагель способен удерживать влагу различных видов и форм связи с твердой фазой: капиллярную влагу различных состояний в макро- и микропорах и адсорбированную влагу поли- и мономолекулярной адсорбции.

Группу коллоидных капиллярнопористых тел представляли целлюлоза в виде листов беззольных фильтров, пыжевский бентонит и азросил. Во влажном состоянии эти тела способны удерживать, помимо адсорбированной влаги, значительные количества асмотической воды.

Дифференциальные водоудерживающие свойства выбранных объектов исследования были изучены с помощью термограмм сушки и изотерм адсорбции. По уравнению полимолекулярной адсорбции Брунауэра, Эммета и Теллера было рассчитано количество влаги, адсорбированной в монослое. Полученные нами результаты хорошо согласуются с данными, имеющимися в литературе.

Приводятся полученные нами структурные характеристики объектов исследования. По изотермам десорбции воды из силикагеля и целлюлозы было рассчитано распределение микропор по их размерам и построены соответствующие кривые. Структура макропор в кварцевом песке и силикагеле была изучена нами по методу капиллярного впитывания, а в целлюлозе и смесях кварцевого песка с аэросилом или пыжевским бентонитом — по методу вытеснения поглощенной жидкости. В работе приведены полученные по этим методам дифференциальные кривые распределения макропор по их размерам.

На основании анализа данных о пористой структуре и коллоидно-физических и водоудерживающих свойствах показано, что взятые нами для исследования образцы достаточно полно представляют основные группы дисперсных пористых тел.

Опыты по определению гидротермических полей в дисперсных телах при сушке проводились при нескольких значениях температуры сушащего воздуха в циркуляционной установке при постоянной скорости движения воздуха, равной 2,5 м/сек. Перед опытами образцы увлажнялись до полной влагоемкости. Конвективная сушка плоских образцов дисперсных тел толщиной 30 мм производилась в условиях симметричного испарения влаги с обеих поверхностей пластины. По полученным в разное время опыта значениям локального влагосодержания и температуры в слоях тела, расположенных на различных расстояниях от поверхности тела, были построены кривые кинетики гидротермических полей в каждом из взятых нами для исследования образцов в процессе их конвективной сушки.

Результаты полученных нами экспериментальных гидротермических полей представлены в виде кривых кинетики температуры, влагосодержания и скорости сушки в слоях каждого образца в течение всего процесса конвективной сушки. Для всех образцов для различных режимов сушки также построены кривые распределения влагосодержания и температуры по толщине образца в различные моменты от начала сушки, а также кривые зависимости послынных скоростей сушки от влагосодержания тела в соответствующем слое. Всего в работе приведено 14 рисунков полученных гидротермических полей, представляющих их кинетику в процессе сушки исследованных образцов дисперсных тел при разной температуре:

а) для кварцевого песка — 38,7; 112 и 117,5°C (в последнем случае песок был увлажнен водным раствором додецилсульфата натрия);

б) для силикагеля МСМ — 46,8; 100,8; 131,4 и 100,2°C (при

$t_c = 100,2^\circ\text{C}$  производилась сушка силикагеля, увлажненного водным раствором додецилсульфата натрия);

в) для целлюлозы — 38; 65,3; 100,5 $^\circ\text{C}$ ;

г) для смесей:

кварцевый песок + 0,3% аэросила — 101,2 $^\circ\text{C}$ ; кварцевый песок + 6% аэросила — 100,5 $^\circ\text{C}$ ; кварцевый песок + 15% пыжевского бентонита — 100,1 $^\circ\text{C}$ .

Процентное содержание примесей указано по отношению к весу сухого кварцевого песка. Анализ этих кривых с учетом пористой структуры и дифференциальных водоудерживающих свойств исследуемых тел позволил сделать следующие выводы.

Пористая структура дисперсных тел, а также формы связи влаги с телом и ее состояние в порах непосредственно сказываются как на механизме переноса влаги в теле, так и на кинетике гидротермических полей, возникающих в теле при сушке.

В периоде постоянной скорости сушки дисперсных тел выделяется две стадии процесса: начальная стадия прогрева тела и стадия установившейся сушки. В стадии прогрева происходит не только испарение влаги в окружающую среду, но и заметное перераспределение влагосодержания во всем объеме тела. Приведенные в работе кривые распределения влагосодержания по толщине образцов кварцевого песка, силикагеля и целлюлозы в начальной стадии имеют экстремальный характер. Внутри тела образуется максимум влагосодержания, который в течение начальной стадии перемещается к центру тела. Под действием температурного градиента влага капиллярного состояния перемещается от поверхности тела в направлении менее нагретых частей, т. е. внутрь тела.

После завершения начальной стадии распределение влагосодержания в теле приближается к параболическому, и в теле устанавливается квазистационарный температурный режим. В этой стадии процесса скорость сушки отдельных слоев тела постоянна и по величине тем больше, чем ближе к поверхности тела расположен данный слой.

В таких поликапиллярнопористых телах, как силикагель и целлюлоза завершение периода постоянной скорости сушки в слое тела сопровождается одновременным повышением температуры в том же слое. При сушке же кварцевого песка температура во всех слоях остается почти неизменной вплоть до завершения периода постоянной скорости сушки внутри тела, в наиболее удаленном от его поверхности слое. При этом в поверхностных слоях период постоянной скорости сушки заканчивается раньше.

В первом периоде сушки кварцевого песка, силикагеля и целлюлозы из тел удаляется влага капиллярного состояния ее в макропорах.

Период падающей скорости сушки при мягких режимах ( $t_c = 38,7^\circ\text{C}$ ) в кварцевом песке начинается при переходе влаги в пленочно-менисковое состояние, т. е. при влагосодержании, приблизительно равном 6%. При жестком же режиме сушки кварцевого песка ( $t_c = 112^\circ\text{C}$ ) период падающей скорости сушки начинается при влагосодержании около 3%, что соответствует началу удаления из тела влаги менискового состояния в макропорах.

Начало удаления влаги гигроскопического состояния тела отмечается на кривых кинетики температуры вторичным резким повышением температуры во всех слоях песка почти одновременно и независимо от режима сушки.

Второй период сушки силикагеля и целлюлозы более сложный по сравнению с кварцевым песком. На кривых кинетики послынных скоростей сушки этих тел во втором периоде выделяется еще по одному участку постоянной скорости сушки. Это объясняется многообразием форм связанной с этими телами влаги и удаляемой из них в рассматриваемый период сушки. Анализ послынных кривых скорости сушки, построенных в зависимости от влагосодержания тела, показал, что влага разных форм связи и различных состояний ее в порах дисперсного тела обладает различной подвижностью.

При сушке целлюлозы при температуре воздуха  $100,5^\circ\text{C}$  наблюдалась тенденция к возрастанию скорости испарения влаги полимолекулярной адсорбции, чего не было замечено при удалении адсорбированной влаги из силикагеля.

В работе показана зависимость характера гидротермического поля в дисперсном теле при сушке от пористой структуры тела. Нами было проведено ряд опытов по определению кинетики гидротермических полей в модельных телах. Последние представляли собой смеси одинакового количества кварцевого песка с разными концентрациями азросила или пыжевского бентонита, содержащихся в макропорах песка. В зависимости от концентрации примеси в порах песка мы получали тело с различной пористой структурой и разными водоудерживающими свойствами. Показано влияние концентрации примеси коллоидной фракции в макропорах песка на характер гидротермического поля и на интенсификацию внутреннего массопереноса в смеси.



**Пятая глава** диссертации посвящена выяснению механизма переноса тепла и влаги в капиллярнопористых телах с жесткой пористой структурой.

При изучении неинтенсивных процессов сушки дисперсных материалов существенной характеристикой внутреннего массопереноса является коэффициент диффузии влаги. Нами разработан новый кинетический метод определения коэффициента диффузии влаги в зависимости от влагосодержания тела и его температуры в любой момент времени при сушке. Формула для расчета этого коэффициента выведена на основании единого решения системы дифференциальных уравнений молекулярного массо- и теплопереноса, полученного А. В. Лыковым для всего процесса конвективной сушки тела. При определении коэффициента диффузии влаги предложенным методом используются экспериментальные кривые кинетики локальных влагосодержаний в двух слоях тела и кинетическая кривая интегральной скорости сушки. Таким образом были рассчитаны и построены приведенные в работе кривые зависимости коэффициента диффузии влаги от влагосодержания для кварцевого песка и силикагеля при их конвективной сушке.

Полученные нами экспериментальные данные по определению полей влагосодержания и температуры в кварцевом песке и силикагеле при конвективной сушке были обработаны также аналитическим методом восстановления полей, разработанным А. Г. Темкиным. В работе кратко изложена идея метода восстановления полей и приведены основные формулы, при помощи которых определяются параметры внутреннего тепло- и массопереноса. Конечный результат расчета основных коэффициентов и критериев внутреннего тепло- и массопереноса в кварцевом песке и силикагеле приведен в виде таблиц, выражающих зависимость этих параметров от влагосодержания и температуры тел в процессе их конвективной сушки.

Одна из важнейших характеристик сушки — критерий фазового превращения — была рассчитана также для всего процесса сушки кварцевого песка и силикагеля при помощи известной формулы А. В. Лыкова по данным кинетики поля температуры и скорости сушки. Это позволило оценить интенсивность испарения воды в капиллярнопористых телах при сушке и выделить из общего потока долю влаги, перемещающейся в виде пара.

Совместный анализ параметров внутреннего тепло- и массопереноса и кривых кинетики гидротермических полей дает

возможность представить физическую картину движения влаги и тепла в капиллярнопористых телах при конвективной сушке ( $t_e = 112—131^\circ\text{C}$ ) в следующем виде.

В процессе удаления из макропор кварцевого песка и силикагеля влаги капиллярного состояния основное количество движущейся воды перемещается к поверхности испарения в виде жидкости. Одновременно часть влаги испаряется внутри тела и в виде пара диффундирует по макропорам в окружающую среду. Доля парообразной воды в общем потоке составляет приблизительно 10%.

По мере удаления из макропор тела влаги капиллярного состояния интенсивность внутреннего испарения возрастает, и при переходе влаги в пленочно-менисковое состояние количества парообразной и жидкой влаги в общем потоке массопереноса в теле одинаковы.

В дальнейшем при сушке грубодисперсного кварцевого песка интенсивность внутреннего испарения остается почти неизменной вплоть до удаления из тела влаги менискового состояния. Однако, удаление из силикагеля влаги пленочно-менискового и менискового состояния, а также гигроскопической влаги микропор происходило в условиях линейного возрастания критерия фазового превращения. Это свидетельствует, как показал Ю. А. Михайлов, о появлении зоны парообразования в теле и линейном распространении ее в процессе сушки от поверхности вглубь тела. В момент распространения зоны парообразования на весь объем тела влагосодержание силикагеля равнялось 10%, что соответствует максимальному количеству адсорбированной влаги. Адсорбированная силикагелем вода испаряется одновременно во всем объеме образца и в виде пара диффундирует к поверхности тела.

Опыты по сушке кварцевого песка показали, что постоянная скорость сушки может поддерживаться только при движении влаги по капиллярам и при пленочном течении жидкой воды по стенкам капилляров к поверхности испарения. Этим подтверждается представление Б. В. Дерягина, В. С. Нерпина и Н. В. Чураева о роли пленочного движения влаги в капиллярнопористых телах.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Получено численное решение системы дифференциальных уравнений молекулярно-молярного тепло- и массопереноса методом матричной факторизации. Решение приведено в виде логически простого алгоритма, который может быть использо-

ван для расчета процессов переноса тепла и влаги в дисперсных телах при помощи электронных вычислительных машин.

2. Разработана и смонтирована лабораторная установка для экспериментального определения гидротермических полей в дисперсных телах в процессе конвективной сушки.

3. Проведено дальнейшее аналитическое и экспериментальное развитие метода определения локального влагосодержания в дисперсном теле с помощью гаммаскопии. Получены выражения, определяющие чувствительность и погрешности, возникающие при измерении локального влагосодержания методом гаммаскопии. Получены основные соотношения, необходимые для проектирования и расчета узлов блока гаммаскопии, и определены оптимальные условия применения рассматриваемого метода для определения локального влагосодержания в дисперсном теле.

4. Определены основные характеристики микро- и макропористой структуры и водоудерживающие свойства объектов исследования, являющихся типичными представителями основных групп дисперсных пористых тел.

5. Экспериментально определены нестационарные влагосодержания и температуры в дисперсных пористых телах в процессе их конвективной сушки при разных температурах сушащего воздуха.

6. Выявлена зависимость кинетики нестационарных гидротермических полей в типичных дисперсных телах от их пористой структуры и различия форм связи и состояния влаги в порах тела.

7. Предложен новый кинетический метод определения коэффициента диффузии влаги в дисперсных телах в процессе сушки. Проведен расчет зависимости коэффициента диффузии влаги от влагосодержания кварцевого песка и силикагеля при их сушке.

8. Проведена обработка полученных экспериментально гидротермических полей в дисперсных телах аналитическим методом восстановления полей, в результате чего определены основные параметры внутреннего тепло- и массопереноса в кварцевом песке и силикагеле при сушке.

9. По экспериментальным кривым кинетики полей влагосодержания и температуры в кварцевом песке и силикагеле при сушке рассчитан критерий фазового превращения по формуле А. В. Лыкова.

10. Путем совместного анализа основных параметров внутреннего тепло- и массопереноса и кривых кинетики нестационарных гидротермических полей рассмотрен механизм переноса

са влаги в капиллярнопористых телах с учетом их пористой структуры и различия форм связи и состояния в теле влаги, удаляемой на разных этапах процесса сушки.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на:

1. Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену. Минск, 1961.
2. Научной сессии Совета по высокотемпературной теплофизике. Киев, 1963.
3. Всесоюзном совещании «Применение достижений современной физики в строительстве». Москва, 1964.
4. Всесоюзном совещании по интенсификации процессов сушки в химической и смежных отраслях промышленности. Москва, 1965.

**Основное содержание диссертации опубликовано  
в следующих печатных работах автора:**

1. М. Ф. Казанский, П. П. Луцик. Влияние форм связи поглощенной влаги на кинетику гидротермического поля в поликапиллярно-пористом коллоидном теле при сушке, ИФЖ, т. 3, № 11, 1960.
2. П. П. Луцик. Применение матричной факторизации к решению системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса методом конечных разностей. Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности, № 4, 1966.
3. П. П. Луцик. Аналіз оптимальних умов застосування методу гаммаскопії для вимірювання питомої вологості в дисперсному матеріалі. Легка промисловість, № 4, 1967.
4. M. F. Kazansky, P. P. Lutsick, V. N. Oleynikov. Non-stationary Temperature and Moisture content Fields of porous Bodies in the convection Heat Transfer Process, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 2, pp. 231—239, 1961.
5. П. П. Луцик, Д. П. Литевчук, М. Ф. Казанский. Экспериментальное исследование распределения пор по размерам в капиллярно-пористых телах. Известия высших учебных заведений, технология легкой промышленности, № 2, 1967.
6. В. П. Дущенко, П. П. Луцик. Нестационарное температурное поле в трехслойной среде при наличии фазовых превращений, ИФЖ, т. 4, № 12, 1961.
7. В. П. Дущенко, П. П. Луцик. Аналитическое исследование температурного поля в слоистых средах при фазовых превращениях. Сборник «Теплофизика и теплотехника», изд. АН УССР «Наукова думка», К., 1964.
8. М. Ф. Казанский, П. П. Луцик, В. Н. Олейников. Влияние форм связи влаги на нестационарный тепло- и массоперенос в капиллярнопористых телах. Сборник «Тепло- и массоперенос», т. IV, Госэнергоиздат, М., 1963.
9. М. Ф. Казанский, А. Н. Куландина, П. П. Луцик. Гидротермические свойства типичных коллоидных капиллярно-пористых тел и их зависимость от форм связи поглощенной влаги, ИФЖ, т. 3, № 2, 1960.
10. П. П. Луцик, М. Ф. Казанский. Применение гаммаскопии для исследования кинетики локальных влажосодержаний в толще дисперсных материалов. Тезисы докладов на Всесоюзном совещании «Применение достижений современной физики в строительстве», г. Москва, 1964.

Н. П. П. Луцк. М. Ф. Казанский. Исследование кинетики гидротермических полей в толще материала в процессе его конвективной сушки. Тезисы докладов на Всесоюзном научно-техническом совещании по интенсификации процессов сушки в химической и смежных отраслях промышленности, г. Москва, 1965.

---

БФ 05654. Подписано к печати 24.XI 1967 г. Формат бумаги  $60 \times 84^{1/16}$ .  
Объем 1,25 печ. л. Заказ 2528. Тираж 180.

---

Киев, тип. № 3, цех 2