УДК 66.047

СОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ *

В.И. Коновалов[1], Т. Кудра[2] , Н.Ц. Гатапова[1]

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» (1);
Энерго-технологический центр «Канмет», Монреаль, Канада (2)

Ключевые слова и фразы: капиллярные модели; кластерные модели; механизм сушки; перколяционные системы; пористые структуры; фрактальные системы; явления переноса.

Аннотация: Даны представления о современных подходах в теории переноса при сушке: сетевые капиллярные структуры, перколяционные системы, кластерный анализ, фрактальные модели. Приведена библиография с комментариями. Показана необходимость индивидуального учета явлений, лимитирующих механизм сушки и качество материалов. Даны примеры такого подхода на базе температурно-влажностных зависимостей и модельного описания химических и реологических процессов.

1

Для понимания и успешной разработки сушильных технологий и оборудования первостепенное значение имеет изучение всего комплекса многочисленных «элементарных» **явлений переноса, составляющих реальную сушку**.

К сожалению, до сих пор основными книгами по явлениям переноса при сушке остаются работы А.В. Лыкова.

[1]. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М. : ГИТТЛ, 1954. 296 с. Эта книга (так же как большинство его книг) сразу была переведена на английский (и немецкий) язык и **регулярно цитируется** до настоящего времени.

[2]. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергия, 1978. 480 с. Это последняя монография А.В. Лыкова с двумя большими разделами (из шести) по явлениям переноса. К сожалению, она **не была переведена на английский** и поэтому упоминается в работах только некоторых зарубежных ученых, владеющих русским языком. Это справочник нового типа – по выражению А.В. Лыкова, он сильно математизирован, изложение материала в нем сжатое и сложное, и он недостаточно используется и в отечественных работах.

При изучении **сушильных явлений переноса** (в том числе для **клеточных** структур) особенно важен подход к ним с позиций **физической**, **коллоидной** и **биохимии**, а для многих сушильно-термических технологий качество продуктов

---

* Раздел 2 Пленарного доклада на 3-й Международной научно-практической конференции СЭТТ–2008 (Москва, 16 сентября 2008 г.), совмещенный с материалами Лекции 1 на Школе молодых ученых, аспирантов и молодых преподавателей СЭТТ–2008 (Тамбов, 19 сентября 2008 г.). См. также предыдущую статью в данном выпуске «Вестника ТГТУ». Стиль доклада и лекции, в основном, сохранен.

определяется также **химическими** и **структурно-реологическими** превращениями.

Из многих **общих** монографий по явлениям переноса главным базовым учебником в мире стала книга Бёрда-Стьюарта-Лайтфута (или «**БСЛ**») «Явления переноса», вышедшая в русском переводе в 1974 году. В 2002 году вышло ее 2-е американское издание: **[3]. R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot. Transport Phenomena.** 2nd Ed. New York: Wiley, 2002. 895 pp. К сожалению, **в БСЛ**, как в 1-м, так и во 2-м изданиях, **перенос в пористых и дисперсных средах не рассматривается**. Обстоятельно и с разных позиций в **БСЛ** рассматриваются вопросы испарения, самоиспарительного охлаждения и др. «жидкофазные» процессы, однако слова Drying, Adsorption вообще отсутствуют даже в предметных указателях.

С 1985 года проводятся весьма квалифицированные Международные симпозиумы по явлениям переноса: «**International Symposium on Transport Phenomena (ISTP)**». Они несколько напоминают симпозиумы **IDS** и проводятся в разных странах, но через 1–2 года.

17–20 августа 2008 года состоялся уже **19th ISTP**, в Рейкъявике, Исландия. Предыдущие были в Гонолулу, Токио, Сиднее, Акапулько, Сан-Франциско, Сингапуре, Киото, Бангкоке, Праге и др. Ранее на ISTP была наша секция: **Porous and Particulate Systems**. Сейчас секции более общие **Heat and Mass Transfer** и **Transport Phenomena in Multi-Phase Systems**. Иногда издаются труды (в 2-х томах), иногда выпускается диск.

2

Кроме **прямых физико-химических** методов, для описания процессов переноса используются и развиваются **новые модельные физико-математические и процедурно-компьютеризованные подходы,** прежде всего это:

1) структурно-сетевые модели пористых и корпускулярных сред различных структур – «**Pore Network Models»** (случайные, регулярные и пр. **решетки** и **упаковки**); одним из первых примеров таких моделей была **капиллярная модель О. Кришера,** 1956 г.;

2) методология и математический аппарат **теории перколяции** (**percolation** – просачивание); основные ее идеи были сформулированы **С. Броадбентом и С. Хаммерсли** в 1957 г.; для наших задач – это рассмотрение условий протекания–переноса жидкости или газа в зависимости от статистических характеристик решеток, моделирующих дисперсные или пористые среды (перколяция по связям, перколяция по узлам);

3) кластерный анализ (**cluster** – пучок, связка) – статистическое выявление обособленных структур; в задачах переноса изучаются объединения–кластеры проводящих участков, частиц, молекул и пр., их размеры, характеристики и связь с переносными свойствами среды; разновидности кластерного подхода давно использовались в задачах классификационного анализа (напр., номенклатура К. Линнея, XVIII в.); сейчас термин «кластер» стал модным и применяется в самых различных областях – от молекулярных процессов до экономики и политики;

4) фрактальный анализ – «**Fractal Theory»** (**fractus** – дробленый) – моделирование и изучение свойств геометрических элементов (линий, поверхностей, объемных образований), учитывающее изменение длины, площади, объема при изменении масштаба измерения; термин введен **Б. Мандельбротом** в 1975 году, хотя ряд фрактальных особенностей изучался и ранее другими учеными; главная книга Мандельброта «**Фрактальная геометрия природы**», впервые изданная на английском языке в **1977** г., в **2002** году вышла на русском языке.

Все вышеперечисленные 4 подхода часто выступают совместно.

В связи со специфичностью и относительной сложностью этих областей здесь мы ограничимся приведением для первоначального знакомства **нескольких** основных **направлений** работ и **библиографии**, прежде всего – **зарубежной**.

[4]. Недавно начатое **5-ти томное издание** книги по сушке **с теоретическим уклоном** «Современные сушильные технологии» под редакцией Е. Тсотсаса и А.С. Муджумдара: **Tsotsas E., Mujumdar A.S. (Eds). «Modern Drying Technology», in 5 Vols.** Weinheim: Wiley – VCH, 2007… В 2007 году вышел 1-й том, **в ноябре 2008 года выходит 2-й том**.

Состав томов:

Vol. 1. – Computational Tools at Different Scales, 2007. 321 pp. (149 Euro) – Вычислительные инструментальные средства в различных масштабах.

Vol. 2. – Experimental Techniques, 2008. 384 pp. (149 Euro) – Экспериментальная техника.

Vol. 3. – Product Quality and Formulation (planned) – Качество продуктов и регламенты.

Vol. 4. – Energy Savings (planned) – Энергосбережение.

Vol. 5. – Process Intensification (planned) – Интенсификация процессов.

7 разделов уже вышедшего **1-го тома** вполне отражают основные направления новых зарубежных компьютеризированных работ **по теории сушки**.

1) «**Comprehensive Drying Models Based on Volume Averaging: Background, Application and Perspective**» ~ **Комплексные модели сушки, основанные на объемном усреднении**, by **P. Perre** (Национальная школа агроинженерии, Нанси, Франция), **R. Remond**, **I.W. Turner**. Это численное моделирование по ячейкам, с применением к древесине, пищепродуктам, в том числе с большой усадкой. Одна из статей проф. Перре в этой области была опубликована в нашем «**Вестнике ТГТУ**»: **P. Perre`. Le sechage de materiaux deformables //** Trans. TSTU. 2004. V. 10. № 1A. S. 120–139 (*на франц. яз.*).

2) «**Pore-Network Models: A Powerful Tool to Study Drying at the Pore Level and Understand the Influence of Structure on Drying Kinetics**» ~ **Сетевые модели пористой структуры: мощный инструмент для изучения сушки на уровне пор и для понимания влияния структуры на кинетику сушки**, by **T. Metzger**, **E. Tsotsas** (Отто-Герике университет, Магдебург, Германия), **M. Prat**. Здесь разрабатываются модельные структуры пор с капиллярным переносом жидкости и диффузионным переносом пара, отрабатывающие по изложению авторов, несмотря на упрощение строения, кинетику сушки в 1-м и 2-м периодах. Одна из статей группы проф. Тсотсаса в этом плане также была опубликована в нашем «**Вестнике ТГТУ**»: **Beissner H., Tsotsas E. Einfluss einer Gas-Flussig-Grenzflache auf die Waschkinetik poroser Stoffe //** Trans. TSTU. 2004. V. 10. № 1A. S. 101–113 (*на немец. яз.*).

3) «**Continuous Thermomechanical Models Using Volume-Averaging Theory**» ~ **Непрерывные термомеханические модели, использующие теорию объемного усреднения**, by **F. Couture**, **P. Bernada**, **M.A. Roques** (Университет де По, Франция). Здесь используются модели Вайтеккера (довольно популярные в США) для переноса в многофазных системах, в том числе для деформируемых сред.

4) «**Continuous Thermomechanical Model Using the Theory of Mixtures**» ~ **То же, с использованием теории смесей**, by **S.J. Kowalski** (Технологический университет, Познань, Польша). В 2003 году в издательстве Springer вышла также отдельная книга Ковальского по термомеханике процессов сушки.

5) «**CFD in Drying Technology – Spray Dryer Simulation**» ~ **Численная динамика жидкостей в сушильной технике – моделирование распылительных сушилок**, by **S. Blei**, **M. Sommerfeld** (Мартин-Лютер университет, Халле, Германия).

6) «**Numerical Methods on Populations Balances**» ~ **Численные методы для балансов популяций**, by **J. Kumar**, **M. Peglow**, **G. Warnecke**, **E. Tsotsas** (Отто-Герике университет, Магдебург, Германия), **L. Moerl**, **M. Hounslow**, **G. Reynolds**.

7) «**Process-Systems Simulation Tools**» ~ **Программное обеспечение моделирования процессов и систем**, by **I. Kemp** (Глаксо Смит Кляйн Ко, Хертфортшир, Англия).

Недавно в DRT, 2008, № 6 была опубликована достаточно **критичная рецензия З. Паковского** на 1-й том. При естественной полной поддержке работ в целом – высказываются не менее естественные **сомнения о завышенных оценках авторами возможностей и перспектив** разрабатываемых ими направлений.

[5]. Обстоятельный обзор и собственное исследование по использованию **фрактального анализа в изучении сушки** опубликованы только что в DRT группой А. Муджумдара: **Peng Xu, Arun S. Mujumdar, Boming Yu. Fractal Theory on Drying: A Review.** DRT. 2008. Vol. 26, No. 6. Pp. 640–650 (52 Ref.). Изучались **микроструктура** пор, **макроскопическая** морфология, объемная пористость, **механизм переноса** в извилистых капиллярах, в основном, на продуктах из агара, бананов, апельсинов, а также картофеля, пшеницы и риса. В зависимости от условий сушки **фрактальные размерности** (которые находились экспериментально) менялись для диаметров пор – от 1,3 почти до 2, для поверхностей пор – до 2,8–2,95. Авторами прогнозируется возможность аппроксимаций и эффективность применения **фрактального** подхода в **сетевых** и **перколяционных** моделях структур.

3

Теперь затронем **3 темы** из области **теории и исследования** сушильно-термических процессов:

1) явления переноса при сушке: универсальные модели и реальность. Это материалы исследований, выполняемых на кафедре «Химическая инженерия» (ПАХТ) ТГТУ;

2) описание кинетики сушки и нагрева материалов на базе температурно-влажностных зависимостей (ТВЗ) и индивидуальных модельных подходов. Это одно из основных наших направлений;

3) затем на этой основе обсудим наши материалы и соображения по **реальным** возможностям четырех общих вышеупомянутых популярных подходов: **структурно-сетевых моделей, фрактального, кластерного и перколяционного анализов** для пористых и дисперсных сред.

По многим исследованиям **тем 1 и 2 наиболее подробные сведения** можно найти в **кандидатских** и **докторских диссертациях**, выполненных на кафедре в этой области (**более 30-ти**), в том числе в работах **последних лет**: **Н.Ц. Гатапова** (1992 и 2005 гг.), **Е.Н. Туголуков** (1986 и 2004 гг.), **С.С. Хануни** (1997 г.), **А.Н. Пахомов** (2000 г.), **Е.А. Сергеева** (2000 г.), **А.Н. Колиух** (2001 г.), **И.Л. Коробова** (2001 г.), **А.Н. Шикунов** (2004 г.), **Д.В. Козлов** (планировалась на 2007 г., но пока не завершена в связи с переходом на другую работу).

В настоящее время по сушке на кафедре работают **аспиранты А.Ю. Орлов, Е.В. Романова, Ю.В. Воробьева-Пахомова.**

Из многочисленных **публикаций** кафедры здесь представим только **4 итоговые работы**, наиболее существенные **для дальнейшего изложения**:

[6]. Монография: **Коновалов В.И., Коваль А.М. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование**. М. : Химия, 1989. 224 с. (Рецензия в «Drying Technology – An Intern. Journal». 1990. V. 8, No. 1. Pp. 225–226).

[7]. Редакционная статья в DRT, 2005: **Коновалов В.И. Основные направления исследований по сушке капиллярно-пористых материалов**. Междуна-

родный журнал «Технология сушки» (Тэйлор и Фрэнсис, США) в качестве гостевого редактора выпуска (DRT. 2005. Vol. 23, No. 12), посвященного задачам исследований и разработок в процессах сушки.

[8]. Проблемная статья в ТОХТ (2004): к 100-летию со дня рождения П.Г. Романкова: **Коновалов В.И., Гатапова Н.Ц. Макрокинетика промышленных процессов** // Теоретические основы химической технологии. 2004. Т. 38, № 2. С. 123–132.

[9]. Итоговый Препринт к Вестнику ТГТУ (2004) **Гатапова Н.Ц., Коновалов В.И. Единый подход к кинетике и моделированию сушки растворителей, покрытий, жидких дисперсий, кристаллообразующих растворов и волокнистых материалов** // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2004. Препринт № 09. Т. 10 – Юбилейный, № 1. 64 с.

4

Явления переноса при сушке: универсальные модели и реальность. Наибольшее распространение для описания взаимосвязанного тепло-, массо- и барапереноса имеет знаменитая классическая система уравнений А.В. Лыкова, учитывающая перекрестные эффекты и построенная на базе линейной термодинамики необратимых процессов (**ТНП**).

Она включает три линейных параболических уравнения, каждое из которых включает по три оператора Лапласа:

$$\partial T/\partial\tau = K_{11}\nabla^2 T + K_{12}\nabla^2\theta + K_{13}\nabla^2 p;$$

$$\partial\theta/\partial\tau = K_{21}\nabla^2 T + K_{22}\nabla^2\theta + K_{23}\nabla^2 p;$$

$$\partial p/\partial\tau = K_{31}\nabla^2 T + K_{32}\nabla^2\theta + K_{33}\nabla^2 p.$$

В систему входят 9 термодинамических коэффициентов K_{ij}, включающих, в свою очередь, 6 «емкостных» и 6 «кинетических» характеристик переноса (коэффициенты тепло-, массо- и баропроводности λ, D, ap; термо- и бароградиентные коэффициенты δ, δp; критерий фазового превращения ε).

Существуют и **еще более общие**, в том числе **нелинейные**, подходы и модели.

При всей **познавательной**, **теоретической и методологической ценности** таких подходов, **трудности и неизбежные погрешности** определения многочисленных взаимовлияющих переносных коэффициентов и последующих расчетов делают эти методы **малореальными для практического** применения.

Однако, кроме того, и это **еще более важно** – все эти модели **только интегрально**, совместно учитывают **конечные результаты** переноса разных видов и **не раскрывают реальной физической картины конкретных** процессов и явлений, **каждое** из которых в определенных условиях может оказаться **лимитирующим**.

Типичные общие примеры:

– явления переноса тепла и влаги в твердой **гетеропористой**, **клеточной**, **корпускулярной** или **смешанной** структуре и «внутри» элементов «**скелета**» тела, включающие:

– капиллярный и пленочный перенос жидкости;

– диффузионный и фильтрационный перенос жидкости и пара;

– натекание, защемление и расширение воздуха;

– перемещение зоны испарения;

– стефановский поток, термодиффузию, эффузию и пр.

Для процессов тепловой сушки известно **более 30 таких «элементарных» явлений**.

Реальные конкретные процессы сушки и термообработки сопровождаются **еще более многочисленными «осложняющими»** явлениями.

Типичные **конкретные группы** таких явлений:

– **физико-механические** процессы и явления (миграция и кристаллизация растворенных веществ; усадка, коробление, трещинообразование, образование внутреннего избыточного давления в материале, разрушение; пленко- и коркообразование; внутреннее и поверхностное поро- и пузыреобразование и пр.);

– **физико-химические** процессы и явления (отверждение, полимеризация, реакции активных групп пропиточных составов с твердым скелетом, окисление, деструкция и пр.);

– **деформационно-реологические** превращения (формообразование, вытяжка и усадка; перестройка поровой, аморфной, кристаллической, ориентационной и надмолекулярной структуры вещества и пр.).

Подсчитать **их общее количество** для процессов тепловой сушки и термообработки просто **нереально**, так как для каждого нового процесса и продукта могут появляться новые варианты и разновидности этих явлений. Уже в тех процессах, которыми мы конкретно занимались, их **более 100**.

5

Описание кинетики сушки и нагрева материалов на базе температурно-влажностных зависимостей и индивидуальных модельных подходов. Нами рассматриваются, прежде всего, **неизотермические** процессы сушки или так называмые процессы сушки материалов **с существенной температурной кинетикой**, когда нельзя свести задачу к чисто диффузионной, а необходимо рассматривать как влажностную, так и температурную кинетику и их взаимосвязь.

Сразу подчеркнем, что **сложности** анализа и расчета таких процессов состоят **не в математических**, а **в физико-химических проблемах – в недостаточной изученности** их механизма.

Поэтому при **промышленном** проектировании обычно ограничиваются **балансными** тепловыми расчетами (то есть **статикой**), а **продолжительность** процесса (**кинетика**) выбирается по результатам **экспериментов**.

Иногда (обычно при участии в проектировании научных работников) выполняются также упрощенные кинетические расчеты удаления влаги $u(\tau)$, построенные на эмпирических аппроксимациях скорости сушки $N(u)$ по периодам.

Еще реже встречаются расчеты на базе одних дифференциальных уравнений диффузии.

Однако на практике последние тоже часто неработоспособны из-за нестабильности коэффициентов диффузии. Коэффициенты диффузии могут изменяться для одних и тех же материалов в десятки раз и при этом имеют ограниченную познавательную ценность, так как они также не раскрывают механизма переноса.

При этом взаимосвязанная с диффузией кинетика нагрева продуктов в процессе сушки $T(\tau)$ обычно не рассчитывается.

В то же время **кинетика нагрева часто является более важной**, чем собственно кинетика удаления влаги: например, для термолабильных материалов, при химических и структурно-деформационных превращениях.

Именно этими превращениями определяется качество продукта.

Скорость же химических реакций и реологических процессов обычно зависит **от температуры экспоненциально** (например, по типу Аррениуса, Кельвина, Кольрауша и пр.), в то время как зависимость их **от влагосодержания существенно слабее** (линейная или степенная).

Поэтому нами развивается другой подход – с использованием самостоятельных температурно-влажностных зависимостей: $T(u)$ или $T(\tau) + u(\tau)$. Он возможен для процессов и материалов с существенной температурной кинетикой.

Это материалы, у которых время нагрева и время удаления влаги сравнимы по величине, например:

– материалы с покрытиями (в том числе на основе органических растворителей);

– жидкие дисперсии (включая пасты);

– кристаллообразующие растворы;

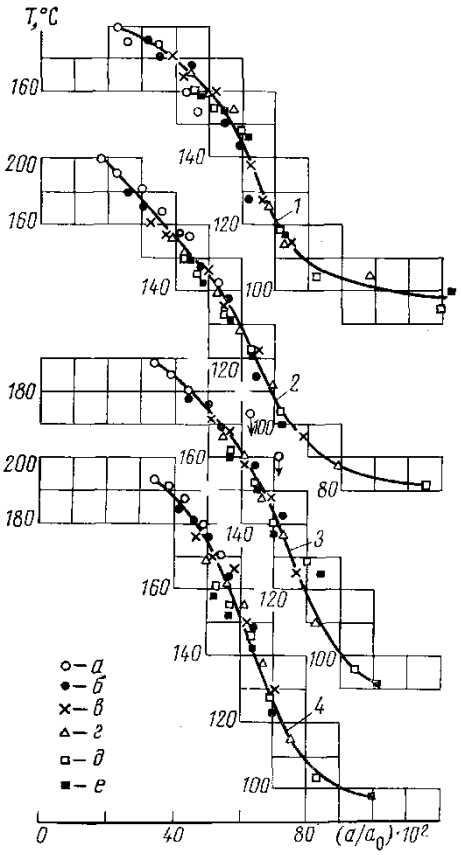
– волокнистые материалы разной природы.

К таким продуктам относится более половины всей номенклатуры высушиваемых материалов.

Для примера на слайде 1 представлены экспериментальные ТВЗ по слоям для десорбции растворителей из модельных цеолитовых столбиков (общая высота 25 мм, набраны из таблеток); они построены по экспериментальным данным В.Ф. Фролова (ЛТИ им. Ленсовета, г. Санкт-Петербург).

Сейчас разработано применение ТВЗ-подхода для основных способов сушки: воздушной конвективной, инфракрасной, в среде перегретого пара, кондуктивной барабанной, с индукционным теплоподводом.

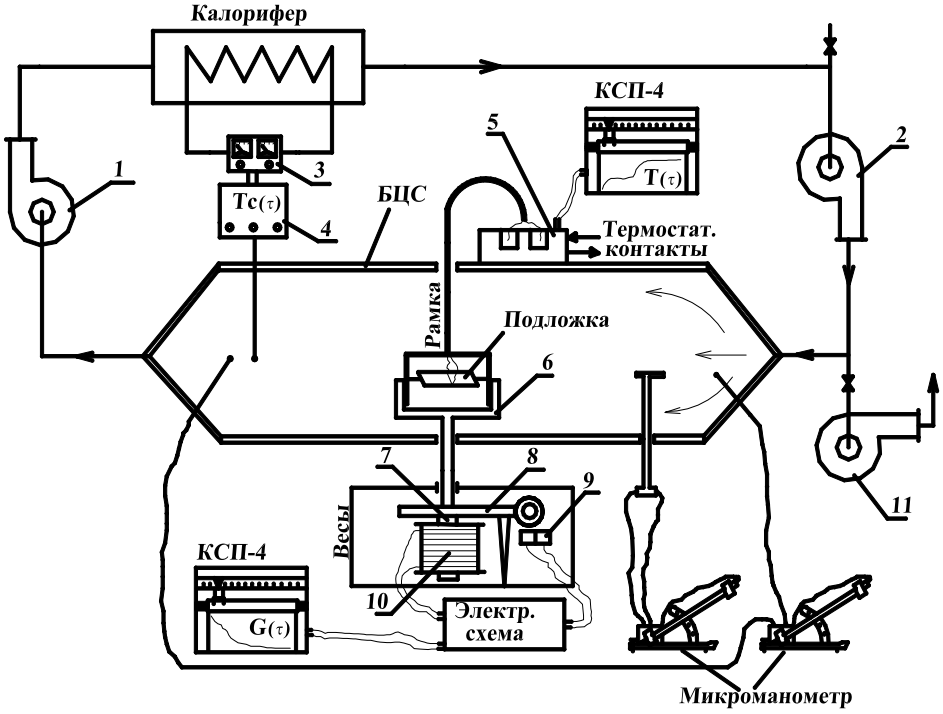
Показаны также возможности его применения и для других способов сушки: микроволновой, сублимационной и других.



Слайд 1. Температурно-влажностные кривые десорбции растворителей из цеолитов [6]:
T_c = 208 °C; *1, 3, 4* – w = 9,2 м/с; *2* – w = 6,5 м/с; *1* – NaX + H_2O; *2* – CaA + H_2O;
3 – NaX + C_2H_5OH; *4* – NaX + C_6H_6; расстояние от поверхности, мм:
а – 3,7; *б* – 7,4; *в* – 11,1; *г* – 14,8; *д* – 18,5; *е* – 20,4

В модифицированном виде разрабатываемый подход может быть полезен и для материалов с преимущественно диффузионным сопротивлением.

Изучение температурной кинетики дает и **другие преимущества и возможности**.



Слайд 2

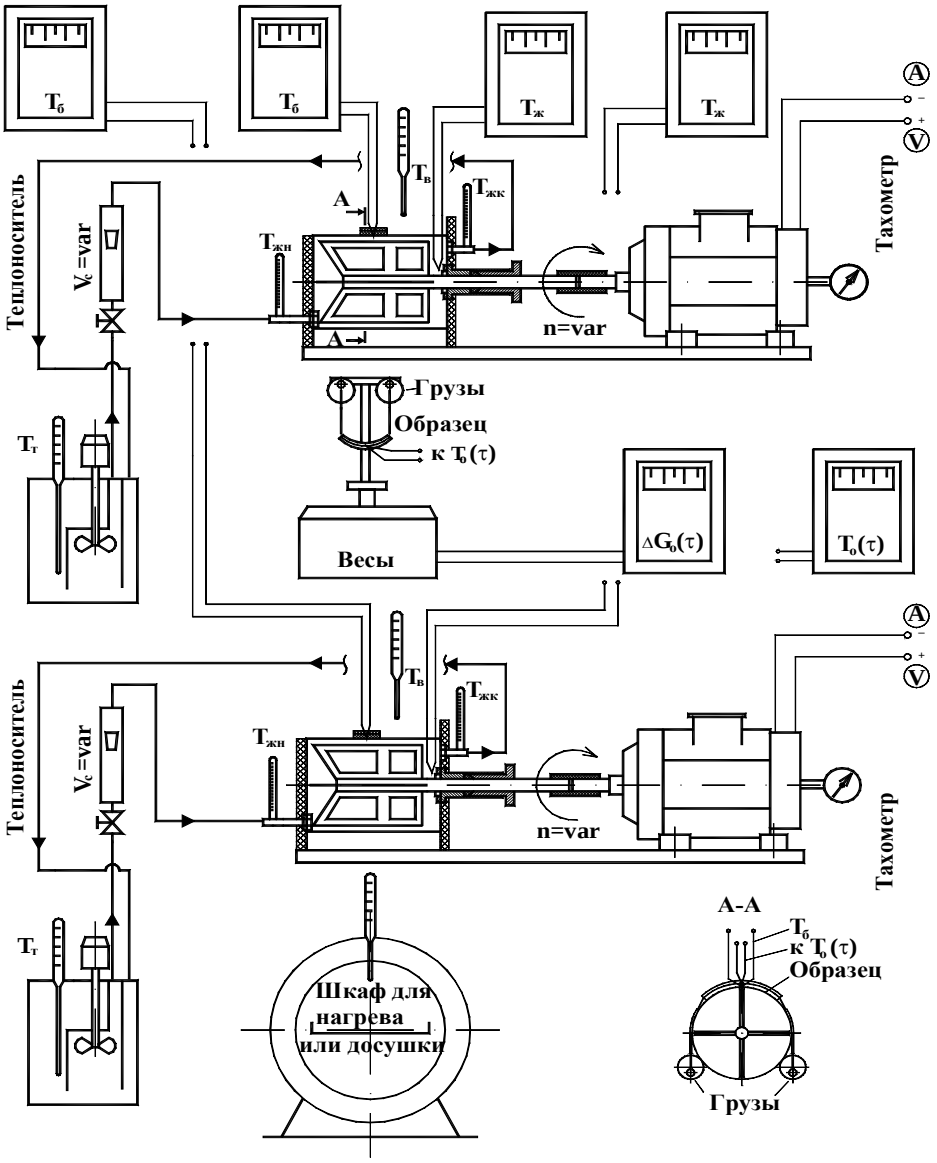
Слайд 3. Большая циркуляционная конвективная сушилка (БЦС)

Температурные кривые $T(\tau)$ и $T(u)$ для материалов и процессов с существенной температурной кинетикой имеют **выраженные температурные площадки или перегибы** и являются поэтому **более наглядными и информативными** для анализа механизма сушки и явлений переноса, чем близкие к **монотонным** кривые убыли влагосодержания $u(\tau)$. При этом они **более надежны**, чем получаемые дифференцированием традиционные **кривые скорости сушки** $N(u)$, $N = -du/d\tau$.

Такой подход позволяет также выявлять, моделировать и учитывать другие конкретные лимитирующие явления.

Необходимые ТВЗ в настоящее время пока получаются из сушильных экспериментов. Дальнейшая, весьма сложная задача – разработка **способов предсказания ТВЗ**.

Два примера (схемы и фотографии) из многих созданных и используемых на кафедре **экспериментальных установок** показаны на следующих слайдах (слайды 2 и 3; 4 и 5).



Слайд 4

Слайд 5. Двухбарабанная кондуктивная установка (2-БКУ)

Особенности БЦС: быстровставная рамка с образцом; термопара в образце, подсоединяемая через ртутные контакты; весы на магнитной подвеске; два циркуляционных вентилятора, обеспечивающие нулевой перепад давления в рабочей камере; возможность измерения малых скоростей обдува по перепаду давления в рабочей царге; выдвижные ИК-панели для прерывистого ИК-теплоподвода; рамки, обеспечивающие натяжение кордных образцов; различные сменные подложки для образцов дисперсий и паст. В настоящее время потенциометры типа КСП заменяются приборами с цифровым выходом.

Особенности 2-БКУ: кондуктивные барабаны с внутренними мешалками, обогреваемые маслом или водой из термостатов; быстросменные накладные образцы с термопарами и с переменными грузами; два циклически сменяемых режима по температуре и интенсивности теплоподвода; быстрое периодическое взвешивание образцов на гибкой подложке.

Многочисленные эксперименты и их анализ показывают, что при воздушной конвективной сушке возможно **6 основных типов кинетических кривых**, характеризуемых по наличию или вырождению температурных площадок при мягких и жестких режимах сушки.

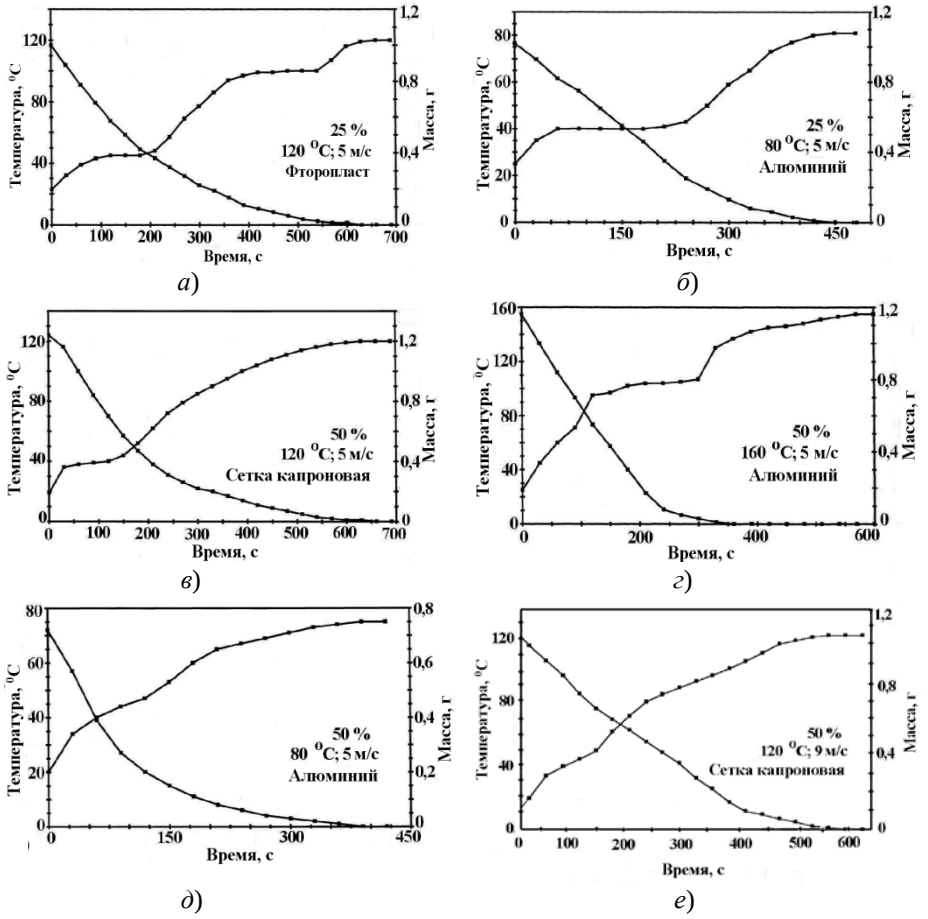
Пример показан на слайде 6:

– **1-й тип** (*а*) ТВЗ – две площадки вблизи температуры мокрого термометра $T_{мт}$ и вблизи температуры кипения жидкости $T_{кип}$;

– **2-й и 3-й тип** (*б*, *в*) ТВЗ – одна площадка вблизи $T_{мт}$ при температурах воздуха ниже и выше 100 °С;

– **4-й тип** (*г*) ТВЗ – одна площадка вблизи $T_{кип}$;

– **5-й и 6-й тип** (*д*, *е*) ТВЗ – вырождение обеих площадок при температуре воздуха ниже и выше 100 °С, соответственно.



Слайд 6. Типы температурных и влажностных кривых сушки на примере водных дисперсий Р-соли на различных подложках

Площадки вблизи $T_{мт}$ физически соответствуют **поверхностному испарению** влаги и **миграции** растворенных веществ к поверхности, вблизи $T_{кип}$ – объемному «**псевдокипению**» без миграции влаги и возможному возникновению внутреннего **избыточного давления** в материале.

Именно эти, не учитываемые общими моделями, процессы являются лимитирующими для многих процессов сушки.

На поле рисунков слайда 6 указаны: начальная концентрация дисперсии, температура и скорость сушильного агента, материал подложки.

Эти температурно-влажностные зависимости в разработанных методиках используются в качестве **дополнительной характеристики**, гибко отрабатывающей разнообразные особенности конкретных взаимосвязанных процессов. Разработаны и предложены способы их аппроксимации. Возможен **ряд вариантов**: термически тонкое тело; материал значительной толщины с модельной аппроксимацией объемных ТВЗ; локальные ТВЗ, например, для поверхности высушиваемого материала.

Теперь для расчетов в качестве базовых можно использовать хорошо изученные **классические дифференциальные уравнения теплопроводности и диффузии**. Взаимосвязи же процессов переноса, стоки тепла и влаги и другие существенные индивидуальные особенности продукта и процесса учитываются

этими ТВЗ, эквивалентными граничными условиями (**ГУ**) и эффективными кинетическими коэффициентами переноса.

Могут использоваться как аналитические, так и численные решения – это не принципиально. Получены **аналитические решения** многочисленных конкретных задач, приведенные в вышеназванных публикациях.

Базовыми являются задачи для многослойных пластины, цилиндра и шара.

Решения уравнений теплопроводности и диффузии выполняются **итерациями с корректировкой** в процессе счета наименее надежных диффузионных характеристик так, **чтобы расчетные температуры и влагосодержания соответствовали установленной ТВЗ**.

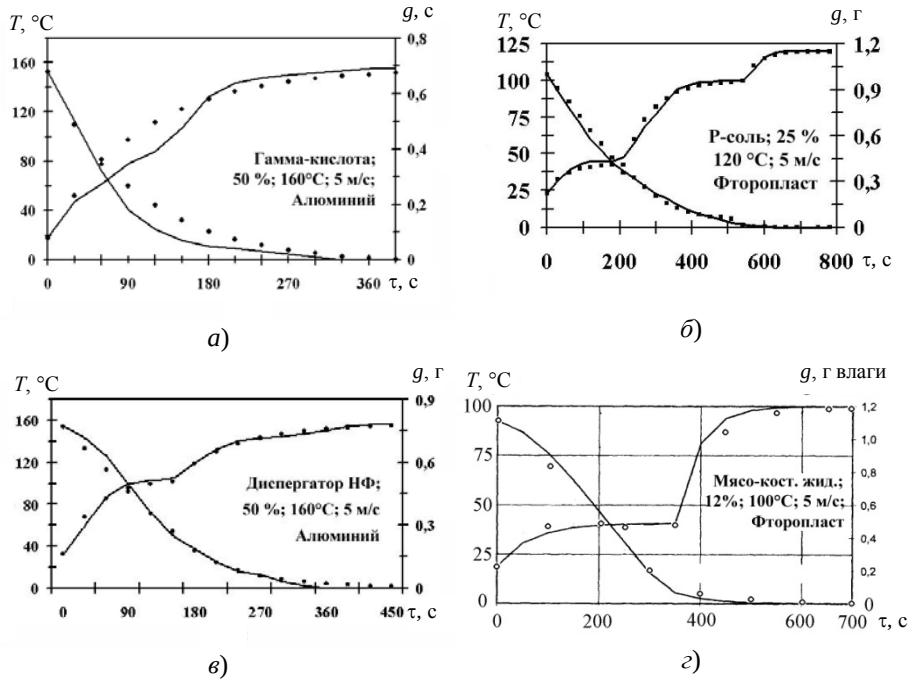
Примеры сравнения расчетных и экспериментальных данных показаны на слайде 7. Погрешность расчетов по времени сушки и нагрева обычно не превышает 10…12 %.

На поле рисунков слайда 7 указаны: продукт; начальная концентрация влаги; температура и скорость воздуха; материал подложки.

Видно, что предложенная **методология отрабатывает все типы кинетических кривых**, что является принципиально важным как для науки о сушке, так и для сушильной практики.

Особо сложными и важными случаями являются процессы **сушки с химическими превращениями**. Скорость химических реакций при этом часто можно приближенно выразить классическими уравнениями **типа Аррениуса**. Например, при сушке и термообработке кордных материалов, пропитанных адгезионными ЛРФ или другими составами, нами был разработан **индивидуальный модельный подход**, в котором изменение концентрации активных групп описывается дополнительным, предложенным нами уравнением

$$\frac{dC}{d\tau} = -k_0 C^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) - C_0 \frac{g_{\text{rest}} + u_0}{\left(g_{\text{rest}} + u\right)^2} \frac{du}{d\tau},$$



Слайд 7. Сравнение расчетных и экспериментальных кинетических кривых сушки

где C_0, C – начальная и текущая концентрации состава, соответственно; E – энергия активации; n – порядок реакции; g_{rest} – привес сухого остатка состава. Здесь 1-й член в правой части характеризует собственно химическую кинетику, а 2-й – изменение концентрации реагента за счет испарения влаги.

Степень химических превращений, в свою очередь, входит в полученную корреляцию с качественными показателями, в данном случае – **с адгезией**.

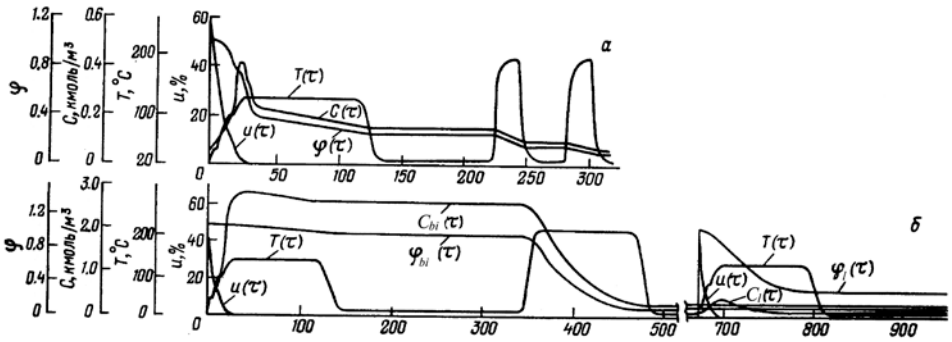
Здесь моделирование позволило выяснить факт принципиальной практической важности: оказалось, что наибольшая прочность связи корда с резиной (адгезия R, Па) обеспечивается при степени превращения активных групп около 75 %, так как остальные ≈ 25 % нужны для связи корда с резиной при последующей вулканизации изделий.

Это может использоваться как расчетный **показатель для оптимизации режима** сушки и термообработки. Расчетные и экспериментальные кинетические кривые **сушки**, **нагрева** и **химических превращений** в процессе обработки приведены для примера на слайде 8. Другими способами исследования и анализа это сделать было невозможно.

Таким же особо сложным случаем является **сушка и термообработка со структурно-деформационными реологическими превращениями**. Скорость развития деформаций материала, во многих случаях, приближенно можно описать на базе реологических моделей. Например, для **термовытяжки и термофиксации кордных материалов** при пропитке, сушке и термомеханической обработке нами был также разработан **индивидуальный модельный подход**, в котором предложено и успешно использовано общее **реологическое уравнение**

$$\frac{d\varepsilon_j}{d\tau}=\frac{F_i/E_j-\varepsilon_j}{\eta_j/E_j}=\frac{\varepsilon_{\infty j}-\varepsilon_j}{\theta_j}.$$

Для различных видов деформаций ε_j (обратимых и необратимых, мгновенных и длительных и пр.) оно переходит в классические модели **Гука, Ньютона, Максвелла или Кельвина**. Для характеристики **задержанных деформаций** дополнительно принята зависимость типа **уравнения А.Я. Малкина** для степени кристалличности полимеров.

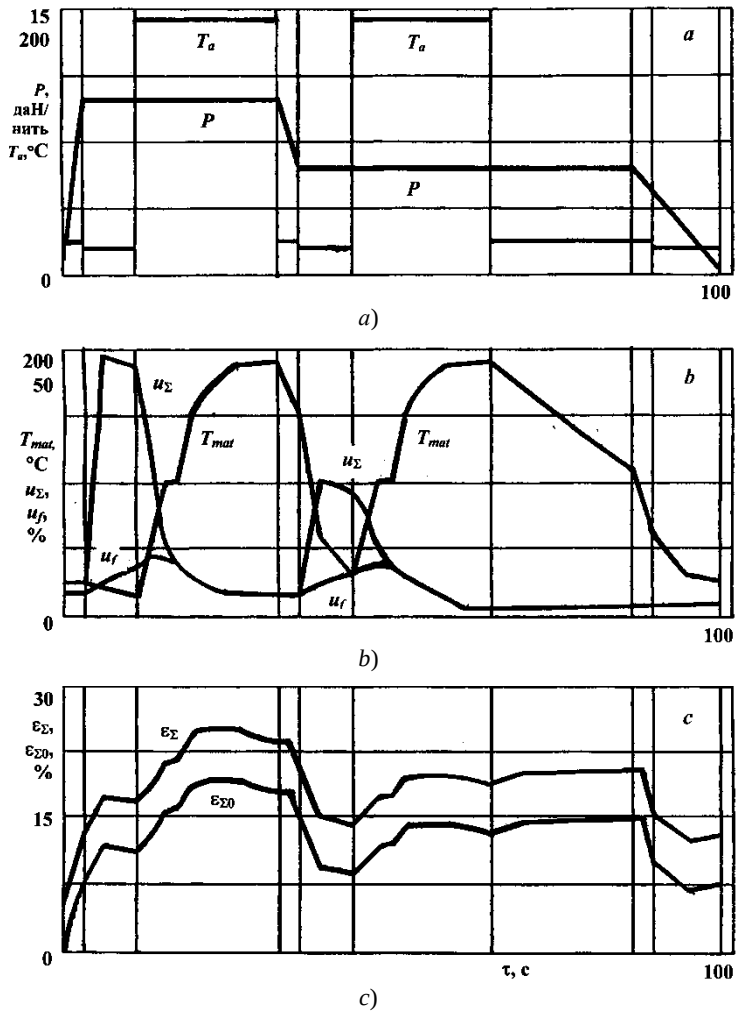


Слайд 8. Кинетика сушки $u(\tau)$, нагрева $T(\tau)$ кордных материалов и химических превращений $C(\tau)$, $\varphi(\tau)$ в пленке адгезива в аппаратах по длине кордной линии (w_0 = 11,7 м/с; без облучения):
а **– капроновый** корд 23КНТС, однократная пропитка ЛРФ-составом, раздельная сушка, термовытяжка и термофиксация; ***б*** **– лавсановый** шнур структуры 9/2/3, двукратная пропитка блок-изоцианатным C_{bi} и латексным C_l составами

Для этих комплексных взаимосвязанных процессов экспериментальное модельное исследование физической картины деформаций и разработка расчетных моделей позволили **выяснить основные виды деформаций** и выделить упомянутые составляющие деформаций **различной природы**.

Примеры **расчетных и интегральных экспериментальных кривых** приведены ниже (слайд 9).

Величины деформаций коррелируют с **физико-механическими свойствами** обработанного материала и могут использоваться для **многокритериальной оптимизации** процессов сушки и термообработки. Другими способами исследования и анализа это сделать также было бы невозможно.



Слайд 9. Температурные, влажностные и деформационные кинетические кривые обработки капронового шинного корда 23КНТС:

a – режимные параметры процесса адгезионной пропитки, совмещенных сушки, термовытяжки и термофиксации P (даН/нить), T_a (°C) в пропиточных ваннах и сушилках-термокамерах по длине кордной линии во времени τ (с);

b – кинетические кривые нагрева T_{mat} (°C), общего влагосодержания u_Σ и влагосодержания волокон-филаментов корда u_f (%);

c – кинетические кривые деформаций общего удлинения корда $\varepsilon_{\Sigma 0}$ и то же в расчете на полностью отрелаксированное суровье ε_Σ (%)

На базе развиваемых комплексных физических и модельных методов решен также еще **целый ряд сложных задач сушки и термообработки**, например, по механизму **образования поверхностных пузырьков** при сушке покрытий, по механизму **испарения органических растворителей** и пр.

В заключение этого раздела отметим, что в рамках вышеперечисленных теоретических подходов **структурно-сетевого моделирования**, **перколяционного**, **кластерного** и **фрактального** анализов конкретные практические **задачи такой сложности ставить и решать не удается**.

6

Материалы и соображения по реальным возможностям структурно-сетевых моделей, фрактального, кластерного и перколяционного анализов пористых и дисперсных сред. Сейчас это популярные компьютеризованные модельные методы. Часто они используются совместно. Имеются и другие виды и варианты методов такого рода.

Кроме работ, отмеченных в начале раздела, обширные **сводки применения таких методов** в сушке даны в недавнем обзоре «Технологии термической сушки – экономически выгодные инновации, обеспечиваемые подходами математического моделирования»:

[10]. Mujumdar A.S., Zhonghua W. Thermal Drying Technologies – Cost-Effective Innovation Aided by Mathematical Modeling Approach. DRT. 2008. Vol. 26, No. 1. Pp. 145–153 (57 Ref.).

Как уже говорилось, такие подходы обычно **не могут учитывать индивидуальные особенности процессов и явлений**, которые, **как правило**, практически и оказываются **лимитирующими**. Поэтому при всей теоретической ценности и необходимости развития этих подходов **первичными являются физико-химические знания** механизма процессов.

Однако такие исследования **весьма трудоемки**, иногда **рискованны**, и сейчас молодежь часто предпочитает менее ответственные **формально-процедурные, но модные** компьютеризованные направления.

В порядке примера и сравнения отметим **еще некоторые отечественные и зарубежные** работы с разными подходами, в том числе сочетающими достоинства обеих групп.

Дадим также **некоторые представления** о рассматриваемых новых направлениях – для тех, кто ими специально не занимался.

Одной из наиболее авторитетных книг, сочетающих высокий уровень **эксперимента** и передовой **математический** аппарат, была **пионерская** книга Левича (к сожалению, она стала сейчас библиографической редкостью).

[11]. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. 2-е изд. М. : ГИФМЛ, 1959. 700 с. (американский перевод – 1962 года, на него регулярно ссылаются и сейчас, в том числе БСЛ). В основном она по жидкофазным процессам, как и БСЛ, но ряд разделов **непосредственно относится к физике явлений, сопровождающих сушку, прежде всего – капиллярные** явления, **пленочные** течения, движение **капель и пузырьков**.

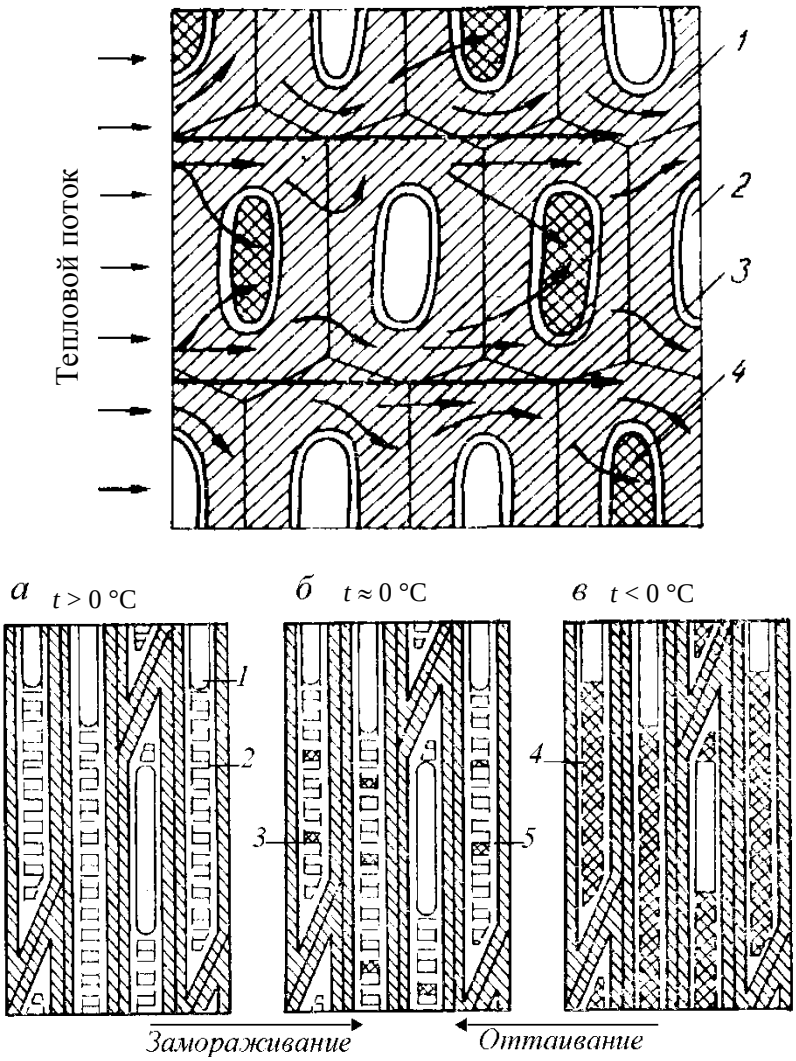
Книга Чудинова отлично характеризует **комплекс явлений переноса в клеточных древесных** структурах, что аналогично **почти всем растительным и животным** пище- и прочим продуктам (к сожалению, эта книга также мало известна процессчикам – даже пищевикам).

[12]. Чудинов Б.С. Вода в древесине. Новосибирск : Наука, 1984. 270 с. В ней приводится, например, много **схем клеточно-пористой структуры** – однако они близки к реальному физико-химическому строению живых систем и **описать их упомянутыми структурно-сетевыми моделями** (включая перколяции, кла-

стеры и фракталы) **нереально**. Соответственно материалы книги носят преимущественно качественный характер. Это не умаляет ее **познавательной** ценности, но для современного инженера этого недостаточно – для проектирования нужен **количественный** подход. Приведем для примера из этой книги **схемы структуры древесины и потоков тепла и массы (воздух, вода, водяной пар, зародыши льда, лед, адсорбционная вода)** в процессах замораживания и оттаивания (слайд 10).

Основные виды **моделей структуры** пористых и дисперсных сред, **капиллярные свойства и основы переноса** в таких средах обстоятельно изложены в книге Хейфеца и Неймарка.

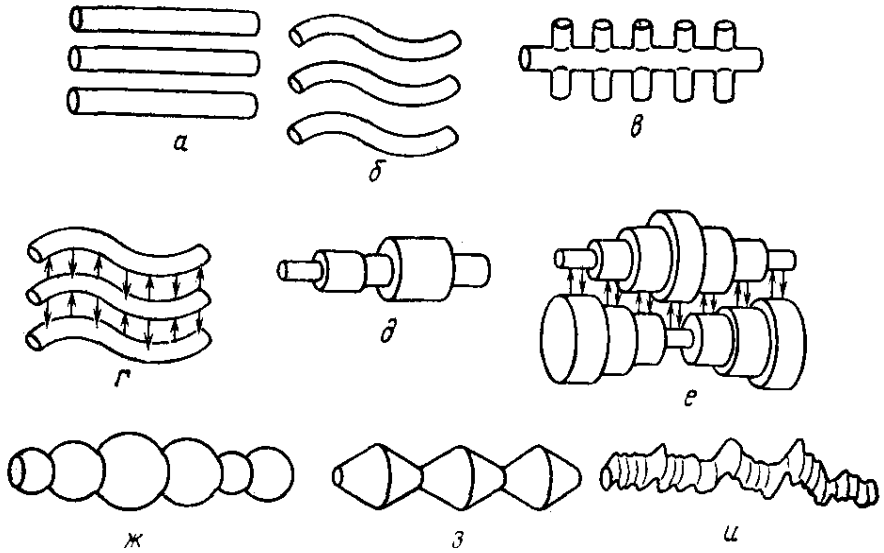
[13]. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. М. : Химия, 1982. 320 с. Она не была переведена на английский язык и почти не цитируется за рубежом (так же, как и в России), хотя являлась бы весьма полезной высококвалифицированной работой, в том числе для **зарубежных** читателей.



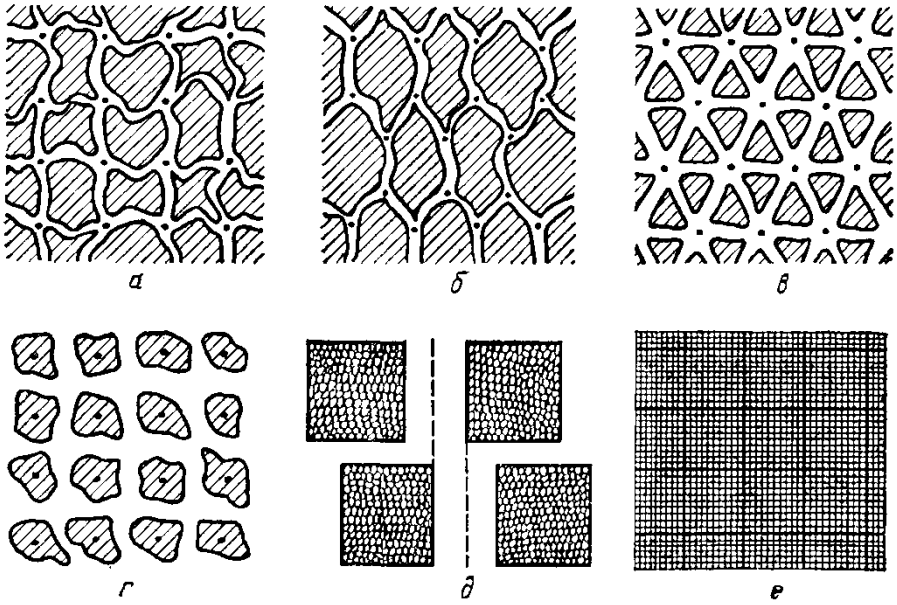
Слайд 10. Схемы клеточно-капиллярного строения древесины и распределения потоков тепла (слева) и массы (справа) в процессах замораживания и оттаивания [12]

Для ознакомления приведем **некоторые схемы и рисунки** из этой книги (слайды 11–15).

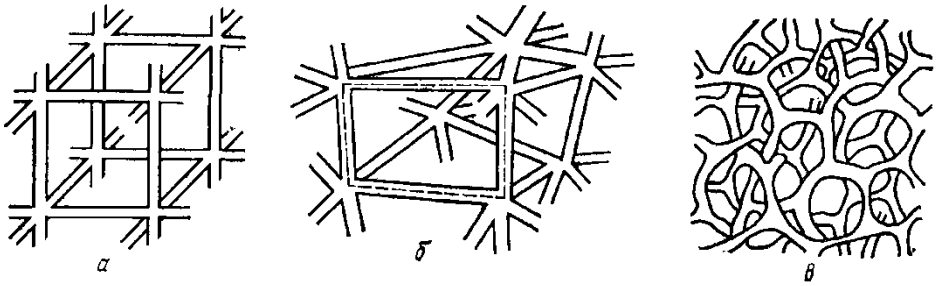
Здесь представлены капилляры прямые, извилистые, с тупиковыми порами, связанные, серийные модели со сферическими, гофрированными и прочими полостями. Такой набор далеко не исчерпывает реальные структуры. Кстати, наиболее **полная и скрупулезная систематизация** капиллярных систем была дана в капитальной **двухтомной монографии Е. Манегольда (1527 с.)**, вышедшей в **1950** и **1955** годах в Германии. ***(Поразительно, но я за всю жизнь ни разу не встречал на нее ссылок; ее нет даже в цитируемой нами сейчас книге [13]. Прим. КВИ).***



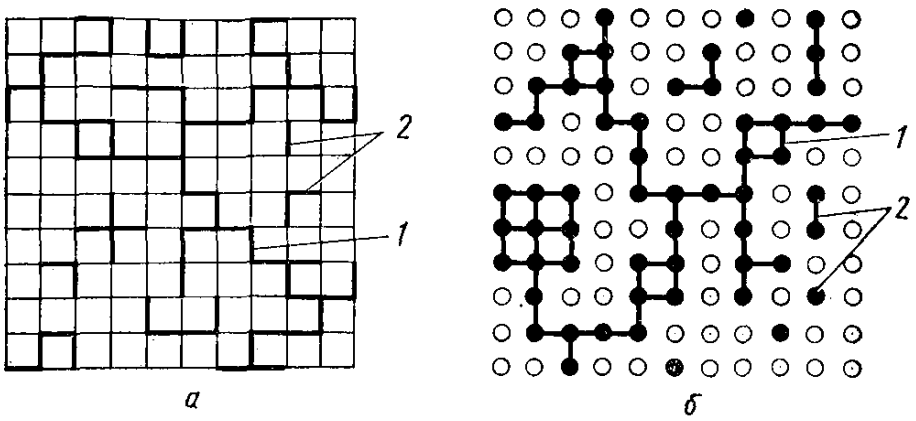
Слайд 11. Одномерные капиллярные модели [13]



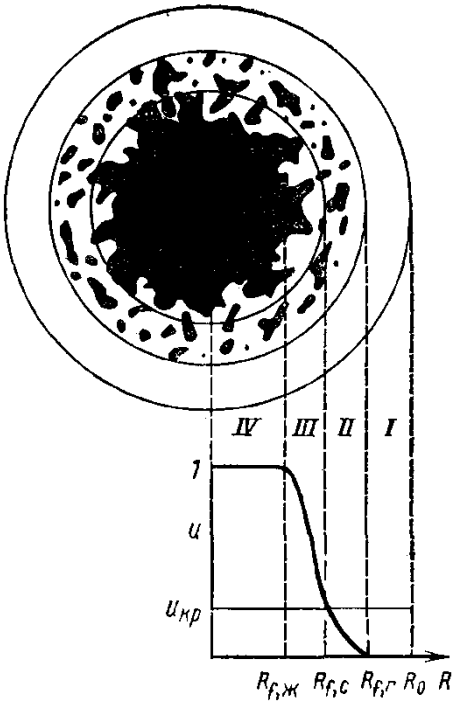
Слайд 12. Двумерные решеточные модели [13]



Слайд 13. Трехмерные решеточные модели [13]



Слайд 14. Задача перколяции по связям (*а*) и по узлам (*б*) [13]



Слайд 15. Схема распределения жидкости и профиль насыщенности пористой частицы при сушке [13]

Несколько разделов в книге Хейфеца–Неймарка **[13]** посвящены **теории перколяции** (см. слайды 14, 15), основные идеи которой были сформулированы **С. Броадбентом и С. Хаммерсли** в 1957 г. в связи с исследованием **задач просачивания** в угольных противогазах.

В том же 1982 г., что и книга [13], в Библиотечке «Квант» вышла книга Эфроса:

[14]. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. М. : Наука, 1982. 268 с., написанная на достаточно высоком уровне для первичного изучения перколяционных процессов (кстати, ее, так же как и ряд других популярных сейчас книг, можно скачать в Интернете).

Теперь о **кластерном анализе**, также названном выше в числе новых методов, применяемом сейчас для анализа (т.н. «**кластеризации**») сложных структур в самых различных областях – от экономики и информатики до тепломассопереноса и физикохимии полимеров. Приведем для иллюстрации примеры кластеров из книги Шогенова и Козлова (слайд 16):

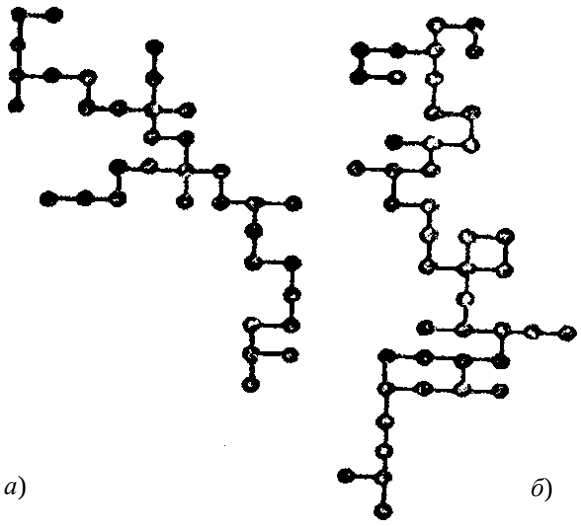
[15]. Шогенов В.Н., Козлов Г.В. Фрактальные кластеры в физикохимии полимеров. Нальчик : Полиграфсервис и Т, 2002. 270 с.

Наконец, о **фрактальном анализе**, также отмеченном в нашей лекции ранее. Классическая книга основателя теории фракталов Б. Мандельброта в **русском** переводе:

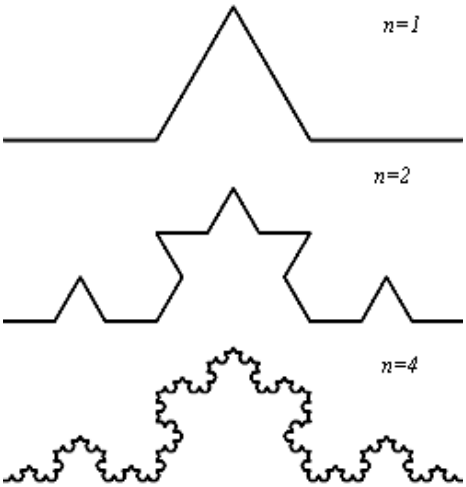
[16]. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Ижевск : изд-во Ин-та компьютер. исслед., 2002. 656 с. (формат **DjVu**). **Английское** издание было выпущено **в 1977** г.

Публикаций по разработке и применению фракталов сейчас также «великое множество», в самых различных научных областях. Дадим некоторые **понятия на простейших примерах** для незнакомых с ними.

Один из первых **геометрических фракталов – кривая Коха**, представленная на слайде 17, был описан шведским математиком Хельге фон Кохом еще **в 1904 году**. Для ее построения единичный отрезок разделяют на три равные части и заменяют средний интервал равносторонним треугольником без этого сегмента. В результате образуется ломаная, состоящая из **4-х** звеньев длиной **1/3**. На следующем шаге **повторяем** операцию для каждого из четырех получившихся



Слайд 16. Схемы кластеров в процессах агрегации:
а – без петель; *б* – с петлями



Слайд 17. Кривая Коха

звеньев **и т.д**. Предельная кривая и есть кривая Коха. **Три копии кривой Коха**, расположенные на сторонах правильного **треугольника**, образуют **замкнутую фигуру**, называемую **снежинкой Коха**.

Такие бесконечно изломанные кривые – не вполне линии. **Кривая Коха нигде не дифференцируема** (не имеет касательных), **хотя всюду непрерывна**.

Сходными геометрическими свойствами обладают **многие природные объекты**. При их измерении получаемые **размеры точно не определены**, они **могут зависеть от масштаба рассмотрения и измерения**, например, **длина береговой линии** измеряемая **при приближении** к ней, в натурных условиях разным инструментом (рулеткой, шагомером, штангенциркулем или на картах разных масштабов), будет увеличиваться.

Для характеристики таких объектов Мандельбротом введено важнейшее понятие фрактального анализа – **фрактальная размерность** (или **хаусдорфова** размерность метрического пространства в теории множеств, введенная **Ф. Хаусдорфом в 1918 г**.).

Наглядно она может толковаться следующим образом.

В **евклидовой геометрии** размерность отрезка – единица, размерность круга – два, шара – три (или: прямая – 1, квадрат – 2, куб – 3).

Например, если мы будем измерять **длину** отрезка, то **метровых** отрезков в нем будет N, **полуметровых – 2N**, **дециметровых – 10N** и т.д. В данном случае наблюдается **прямая** пропорциональность.

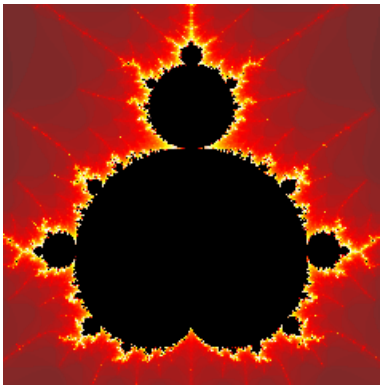
В случае измерения **площади** в таких же единицах мы получим значения: N, $4N$, $100N$, то есть здесь зависимость уже **квадратичная**.

Объем же трехмерных фигур будет пропорционален уже **кубу их линейных размеров:** N, $8N$, $1000N$.

Если попытаться применить эти правила к вышеупомянутым **фрактальным** объектам, возникает **парадоксальная** ситуация – их **размерность окажется дробным числом**.

Фрактальная линия, состоящая из **бесконечного** числа **повторяющихся** отрезков, **как бы выходит** за пределы **одномерного** пространства, вторгаясь в **двухмерное** (она как бы «ометает» его). Она может быть вычислена как соотношение логарифмов **изменения размера** s и **приближения** z

$$D = \lg s / \lg z.$$



а)

б)

Слайд 18

Например, упомянутая **снежинка Коха** строится разбиением отрезка на 4 новых, причем каждый из них будет в 3 раза меньше исходного. Таким образом, при **приближении** какой-либо части фигуры таком, что длина **отрезка** увеличится в **3 раза**, размер фигуры вырастет **в 4 раза**, то есть

$$D = \lg 4 / \lg 3 = 1{,}261.$$

Фрактальная размерность может определяться и **экспериментально**. Так, упомянутая размерность **побережья** лежит между 1,01 и 1,6; размерность **кровеносной системы** человека – приблизительно 3,4.

Важное свойство **геометрических** фракталов – **самоподобие**, упрощающее их **генерацию**.

Многие **природные** объекты, образующиеся путем длительной **эволюции**, оказываются весьма **похожими** на такие фракталы. Это создает **возможность их моделирования**.

Разрабатываются и применяются также методы построения **стохастических** фракталов, характерных для **случайных** процессов (в том числе **турбулентность, плазма** и пр.).

Важнейшими областями применения фрактальных методов являются также **новые** (в том числе **нано-**) **материалы и технологии**, характеристики **химических реакторов**, **странные аттракторы**, методы **нелинейной динамики** и, наконец, **теории хаоса** и **самоорганизации сложных структур**.

Приведем **для иллюстрации** еще два красивых фрактала (слайд 18): *а* – так называемое **множество Мандельброта** (он называл его своей подписью); *б* – фрактальная модель одного из подвидов **цветной капусты**.

7

С учетом вышеизложенного, почти очевидным представляется **вывод, что успешное применение как этих, так и других возможных физико-математических и процедурно-компьютерных методов моделирования возможно только в сочетании с физико-химическими методами и прямым натурным или модельным экспериментом.**

Любая, самая сложная модель – конечна. Любое, самое «простое» природное явление – бесконечно глубоко. Хороший пример этому – фантомы в **«Солярисе» С. Лема**.

Modern Issues of Transfer Theory in Drying

V.I. Konovalov, T. Kudra, N.Z. Gatapova

Tambov State Technical University (1);
CANMET Energy Technology Centre, Varennes, Montreal, Canada (2)

Key words and phrases: capillary models; cluster models; drying mechanism; percolation systems; fractal systems; porous structures; transfer phenomenon.

Abstract: The paper gives insights into present-day approaches to the theory of transfer in drying, such as network capillary structures, percolation systems, cluster analysis and fractal models. The bibliography supplemented with comments is given. It is necessary to take into account factors restricting the mechanism of drying and the quality of materials. The approach is illustrated on the basis of hydrothermal dependencies and model description of chemical and rheological processes.

Moderne Fragen der Theorie der Übertragung bei dem Trocknen

Zusammenfassung: Es sind die Vorlegungen über den modernen Herangehen in der Theorie der Übertragung bei dem Trocknen angegeben: Netzkapillarstrukturen, Perkolationssysteme, Klasteranalyse, Fraktalmodelle. Es ist die Bibliographie mit dem Kommentar angeführt. Es ist die Notwendigkeit der Individualkontrolle der Erscheinungen, die den Mechanismus des Trocknens und die Stoffenqualität limitieren, gezeigt. Es sind die Beispiele solches Herangehens auf Grund der thermofeuchtigkeitlichen Abhängigkeiten und der Modellbeschreibung der chemischen und reologischen Prozesse angegeben.

Problèmes modernes de la théorie du transfert lors du séchage

Résumé: Sont données les représentations sur les nouvelles approches envers la théorie du transfert de chaleur : structures capilaires de réseau, systèmes de percolation, analyse de clasters, modèles fractaux. Est citée une bibliographie avec les commentaires. Est montrée l'importance du calcul individuel des phénomènes limitant le mécanisme du séchage et la qualité des matériaux. Sont donnés les exemples d'une telle approche à la base des dépendences de température et d'humidité et de la description modèle des processus chimiques et rhéologiques.