

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

На правах рукописи

СТЕПАНОВА АЛЛА ИСАЕВНА

ВНУТРЕННИЙ МАССОПЕРЕНОС И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
ПРИ СУШКЕ КЕРАМИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

05.14.04. - Промышленная теплоэнергетика

Сит -

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев-1994



00755785 (.)

AB 31.280

диссертация является рукописью

Работа выполнена в Институте технической теплофизики НАН Украины

Научный руководитель

-доктор технических наук  
Пиевский И.М.

Официальные оппоненты:

-доктор технических наук,  
профессор  
Никитенко Н.И.  
кандидат технических наук  
Величко Ю.М.

Ведущая организация:

-Южгипростром /г.Київ/

Защита состоится

"20" 12

1994 г. в 15 часов

на заседании специализированного ученого совета К 016.43.02  
по защите диссертаций в Институте технической теплофизики  
НАН Украины

/252057, Київ-057, ул. Желябова, 2А/

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТТФ НАН Украины

Автореферат разослан

"14" 11

1994 г.

Ученый секретарь

специализированного ученого совета

кандидат технических наук

Кривошей Ф.А.

## ВВЕДЕНИЕ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ Главными направлениями технического прогресса отрасли промышленности строительных материалов в Украине является получение высококачественной продукции с минимальными затратами топливно-энергетических, материальных и трудовых ресурсов, сокращение энергоемкости производства, расширение местной сырьевой базы за счет вторичных ресурсов и отходов других отраслей.

Важнейшим этапом процесса производства керамических строительных материалов является сушка. На сушку приходится 20-25 % всей потребляемой энергии; сушка, в основном, определяет качество выпускаемых изделий. В этих условиях совершенствование процесса сушки с одновременным улучшением свойств высушиваемого материала приобретает особенно важное значение. Интенсификация процесса сушки керамических строительных материалов лимитируется скоростью внутреннего массопереноса и недостаточной прочностью материала. Поэтому задачи нахождения эффективных способов воздействия на внутренний массоперенос, установления общих закономерностей взаимосвязи процессов переноса, реологических свойств, напряженного состояния и структуры материала, и разработка на этой основе новых методов расчета рациональных режимов сушки и оптимальных составов керамических шихт являются актуальными.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ Целью исследований является интенсификация процесса сушки керамических строительных материалов с одновременным улучшением их качества, разработка новых методов расчета рациональных режимов сушки и оптимальных составов керамических шихт. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Экспериментально исследовать влияние различных параметров и определить эффективные способы воздействия на внутренний массоперенос в керамических строительных материалах.
- Установить общие закономерности изменения коэффициента диффузии влаги в керамических материалах при изменении интенсивности сушки, влагосодержания, температуры и структуры материала.
- Изучить реологические свойства и напряженное состояние изделий из керамических материалов в процессе сушки, проанализировать влияние на них различных параметров и установить эффективные способы сокращения продолжительности и интенсификации процесса сушки и увеличения прочности высушиваемых изделий.
- Установить взаимосвязь между структурой, внутренним массопереносом

сом, реологическими свойствами и напряженным состоянием керамических стройматериалов в процессе сушки и определить область значений основной структурной характеристики, соответствующую керамическим материалам с оптимальными сушильными свойствами.

— Используя результаты исследований, разработать метод определения допустимой интенсивности сушки и методику составления керамических шихт с оптимальными сушильными свойствами.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА — Выявлены основные закономерности и получены аналитические зависимости, описывающие внутренний массоперенос, реологические характеристики, напряженное состояние керамических материалов при изменении интенсивности сушки, влагосодержания, температуры и структуры материала.

— Разработаны новые установки для исследования реологических характеристик керамических материалов в процессе сушки.

— Предложена макроскопическая модель и сформулированы основные уравнения для описания деформационного поведения керамических материалов в процессе сушки.

— Получено решение дифференциального уравнения влагопереноса, учитывающее изменение коэффициента диффузии влаги в процессе сушки.

— Установлены основные параметры, определяющие внутренний массоперенос, реологические характеристики и напряженное состояние керамических стройматериалов и определены области их значений, соответствующие керамическим материалам с оптимальными сушильными свойствами.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ — Разработана методика расчета поверхностных напряжений керамической пластины и предложен метод определения максимально допустимой интенсивности сушки в первом периоде, позволяющие оценить склонность различных видов керамических материалов к разрушению и рекомендовать проведение форсированных режимов сушки для определенного класса материалов.

— Разработан способ оценки сушильных свойств керамических материалов и определения рационального состава керамической шихты, позволяющий получить керамические шихты с оптимальными сушильными свойствами и корректировать состав шихты в процессе производства.

Предложенные методы позволили для определенных классов керамических материалов сократить продолжительность сушки, интенсифицировать процесс сушки и улучшить качество готовых изделий.

Результаты исследований использованы при разработке и внедрении ГОСТа 530-80 "Кирпич и камни керамические", внедрены на Дюжосовском кирпичном заводе и Корчеватском комбинате строительных материалов.

Разработанные методы вошли составной частью в работу "Система контроля и корректировки состава керамической шихты и температурного режима сушки керамических стройматериалов", принятую Межведомственной комиссией 06.07.88г. Работа рекомендована к широкому внедрению и внедряется на предприятиях Украины по производству стройматериалов.

#### ПРЕДМЕТ ЗАЩИТЫ

На защиту выносятся следующие положения:

- Результаты экспериментальных исследований и полученные основные закономерности изменения параметров внутреннего массопереноса и реологических характеристик керамических строительных материалов в процессе сушки.
- Макроскопическая модель и основные уравнения, определяющие деформационное поведение керамических материалов в процессе сушки.
- Аналитические зависимости для расчета и результаты теоретических расчетов поверхностных напряжений керамической пластины в первом периоде сушки.
- Метод определения максимально допустимой интенсивности сушки в первом периоде сушки.
- Способ оценки сушильных свойств керамических материалов и определение оптимального состава керамической шихты.

#### АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты работы докладывались на VII Международном симпозиуме по силикатам /Веймар, 1979г./, VIII Международном симпозиуме по силикатам /Веймар, 1982г./, IУ Всесоюзном совещании по теплообмену /Минск, 1972г./, Всесоюзной конференции по интенсификации процессов сушки и использованию для этих целей новой техники /Калинин, 1977г./, Всесоюзном семинаре "Инструментальные методы реологии" /Москва, 1977г./, Всесоюзной научно-технической конференции по дальнейшему совершенствованию теории, технологии и техники сушки /Чернигов, 1981г./, Всесоюзном семинаре "Технические суспензии и их применение в народном хозяйстве" /Киев, 1984г./, I и II Украинских конференциях по научным основам технологии и развития производства стеновой строительной керамики /Киев, 1969, 1974 г.г./, Республиканской конференции по теплопроводности и диффузии в технологических процессах /Рига, 1976г./, Республиканской научно-технической конференции "Разработка прогрессивных способов сушки различных материалов и изделий на основе достижений тепло- и массообмена" /Черкассы, 1987г./.

#### ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации изложены в 27 публикациях.

#### СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, пяти глав,

выводов и приложений. Текст работы изложен на 130 страницах. Диссертация содержит 40 иллюстраций. Список литературы из 127 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечены актуальность темы, современное состояние проблемы, сформулирована цель работы, показана новизна и практическая применимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ теоретических и экспериментальных исследований по сушке керамических стройматериалов. В настоящее время накоплен достаточно большой опыт в области теоретических и экспериментальных исследований процесса сушки керамических материалов, что позволило разработать многие аспекты теории сушки, создать приближенные методы расчета, разработать новые схемы сушильных установок.

Однако ввиду сложности физико-химических явлений, сопровождающих процесс сушки в керамических материалах, часто используют эмпирический подход как при описании самого процесса сушки, так и при выборе средств, применяемых для улучшения сушильных свойств материала, не учитывая взаимосвязь отдельных характеристик и связь их со структурой материала.

При поиске рациональных режимов сушки часто пренебрегают анализом деформационных процессов, в противном случае, математические модели, используемые для этого анализа либо упрощены, либо получены без учета изменения характеристик в процессе сушки.

Такой подход ограничивает возможности применения проводимых исследований к реальным процессам сушки керамических материалов.

В связи с вышеизложенным актуальной является разработка новых методов расчета рациональных режимов сушки и оптимальных составов керамических шихт, опирающихся на комплексное изучение взаимосвязи внутреннего массопереноса, реологических свойств, напряженного состояния и структуры материала. Решению этих задач посвящена настоящая работа.

Во второй главе приведены результаты исследования влияния различных параметров и определения эффективных способов воздействия на внутренний массоперенос в керамических материалах в процессе сушки. В качестве объектов исследований выбраны глины более чем 10 месторождений, керамические шихты на их основе с различными добавками отощителей, пластификаторов и поверхностно-активных веществ /ПАВ/.

Установлено, что основное различие между керамическими материалами может определяться их гидрофильностью и выбрана структурная характеристика, определяющая гидрофильность — величина мономолекулярной адсорбции  $m$ , на основе которой проводилось сопоставление результатов исследований и классификация исследуемых материалов.

Установлено, что для керамических шихт, состоящих из не взаимодействующих компонентов дисперсных веществ, величина  $m$  является аддитивной по отношению к составляющим компонентам:  $m_{\text{шихты}} = \sum_{i=1}^n C_i m_i$

где  $C_i$  — концентрация,  $i$ -той компоненты в шихте.

Суммарной кинетической характеристикой процессов внутреннего массопереноса в керамических материалах может служить коэффициент диффузии влаги  $A_m$ . Установлено, что формула зависимости коэффициента диффузии влаги от температуры  $A_m = A_{m20^\circ} (T/293)^n$  может быть применена для золокерамических шихт и шихт на основе углеобогащения и флотации руд.  $n$  для исследованных материалов является функцией величины мономолекулярной адсорбции и изменяется от 4 до 7, увеличиваясь при переходе от более гидрофильных к менее гидрофильным материалам /рис. 1/.

Для слабогидрофильных материалов, для которых  $m \leq 0,8\%$ , увеличение температуры на  $10^\circ$  приводит к возрастанию коэффициента диффузии влаги в 1,2 раза. При этом величины коэффициентов диффузии влаги значительно превышают средние значения для керамических масс:  $A_m \gg 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$ .

С помощью статистических методов планирования эксперимента найдены общие закономерности влияния на коэффициент диффузии влаги различных параметров массопереноса. Получена математическая модель исследуемого объекта в виде полинома второго порядка, которая описывает изменение коэффициента диффузии влаги в керамических материалах, характеризующихся различной величиной  $m$  при изменении влагосодержания материала

$U$  и интенсивности сушки  $j$ :

$$A_m = (2,48 + 0,0137U + 3,2j - 3,3m + 1,133m^2 - 0,00833U \cdot m - 1,5jm + 0,00375Uj) \cdot 10^{-4}, \frac{\text{м}^2}{\text{ч}}$$

Основным фактором, определяющим внутренний массоперенос в керамических материалах, является гидрофильность материала. Степень влияния интенсивности сушки и влагосодержания материала также зависит от этой структурной характеристики, увеличиваясь при переходе к менее гидрофильным материалам.

Таким образом, для керамических материалов, величина мономолекулярной адсорбции которых  $m \leq 0,8\%$ , интенсификация процесса сушки сопровождается

ется значительным увеличением скорости внутреннего массопереноса, и следовательно, не осложняется наличием в материале больших градиентов влагосодержаний, приводящих к возникновению опасных напряжений, что дает возможность, увеличив температуру теплоносителя на  $10^{\circ}\text{C}$ , сократить продолжительность сушки изделий, без ухудшения их качества на 7%. Керамические материалы с величиной  $m > 0,8\%$  требуют модификации различными добавками с  $m < 0,4-0,5\%$  таким образом, чтобы величина  $m$  смеси не превышала  $0,8\%$ .

В третьей главе приведены результаты исследований реологических свойств керамических материалов в процессе сушки, проанализировано влияние на них различных параметров и установлены эффективные способы сокращения продолжительности процесса сушки изделий. Для изучения реологических характеристик  $P_m, \mu_m, \mu_k, \eta_m, \eta_k, P_{k1}$ , при температурах до  $100^{\circ}\text{C}$  впервые разработаны установки, в основу которых положены принцип конического пластметра и принцип тангенциального смещения пластины Ребиндера /рис.2/.

Установлено, что для материалов, гидрофильность которых  $m \leq 0,8\%$ , скорость изменения реологических характеристик в процессе сушки возрастает в 3-4 раза по сравнению с более гидрофильными материалами. Для регулирования гидрофильных свойств материала использовались добавки лигносульфонатов кальция /ССБ/ различных концентраций и изменение температуры /рис.3/. Важным результатом действия добавок ССБ и температуры является уменьшение формовочного влагосодержания керамической шихты

$U_{\phi}$ , что позволяет, используя предварительную гидротермальную обработку, снижать при формовании содержание воды в шихте на 4-5% с сохранением прежней пластической прочности.

Таким образом, активное воздействие на гидрофильность керамических материалов с помощью температуры или добавок позволяет сократить продолжительность сушки, в среднем, на 5% и, получать для керамических масс с  $m \leq 0,8\%$  эффективное увеличение прочности при небольшом уменьшении влагосодержания в системе /1-2%/ , что благоприятно сказывается на качестве высушиваемых изделий.

В четвертой главе формулируется макроскопическая модель поведения керамического тела переменной массы в процессе сушки и усадки, устанавливаются факторы, обуславливающие появление касательных напряжений в поверхностных слоях керамической пластины при сушке, анализируется их кинетика, а также оценивается склонность различных видов керамических материалов к разрушению и возможность проведения форсированных режимов сушки для определенного класса материалов. Предполагается, что

анализируемый материал в процессе сушки удовлетворяет гипотезе тензорно-линейной связи между напряжениями и скоростями деформаций и формулируются уравнения неразрывности, определяющие скалярные уравнения, полный тензор напряжений и уравнения равновесия.

Уравнение неразрывности для керамического тела переменной массы в случае отвода влаги имеет вид:  $\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = -\frac{\rho}{1-U} \frac{dU}{dt}$

где  $\rho$  - средняя плотность материала;  $t$  - время.  $\vec{V}$  - вектор скорости. Формулировка первого скалярного определяющего уравнения основывается на предположении, что при чистом сдвиге в процессе сушки керамический материал описывается обобщенной реологической моделью Максвелла-Шведова-Кельвина, в силу чего вторые инварианты девиаторов напряжений и деформаций  $\sigma$  и  $\epsilon$  связаны зависимостью дифференциального типа, инвариантной относительно вида напряженного состояния:

$$a_0(t) \dot{\epsilon} + a(t) \ddot{\epsilon} = b(t) \sigma + c(t) \dot{\sigma} + d(t) \ddot{\sigma} + z(t) \quad /1/$$

Коэффициенты уравнения /1/ являются функциями реологических характеристик материала, изменяющихся в процессе сушки.

Второе скалярное уравнение отражает то обстоятельство, что керамический материал в процессе сушки претерпевает необратимые объемные изменения.

$$P = \xi \left( \frac{1}{1-\theta} \frac{d\theta}{dt} + \frac{\rho_k - \rho_{en}}{\rho_{en} + (\rho_k - \rho_{en})U} \frac{dU}{dt} + \frac{1}{1-U} \frac{dU}{dt} \right) - P_n$$
 где  $P$  и  $P_n$  - соответственно среднее и лапласовское давления, индексы  $k$  и  $en$  относятся к плотности высушенного материала и дисперсионной среды;  $\theta$  - пористость;  $\xi = f(\eta_m, \theta)$

Полный тензор напряжений имеет вид:

$$\Sigma = \left[ \left( \xi - \frac{1}{3} \frac{\sigma}{\epsilon} \right) \left( \frac{1}{1-\theta} \frac{d\theta}{dt} - \frac{1}{1-U} \frac{dU}{dt} + \frac{\rho_k - \rho_{en}}{\rho_{en} + (\rho_k - \rho_{en})U} \frac{dU}{dt} \right) - P_n \right] \mathbf{E} + \frac{\sigma}{\epsilon} \mathbf{L}$$

где  $\mathbf{E}$  - единичный тензор;  $\mathbf{L}$  - тензор скорости деформаций. Ана-

лиз касательных напряжений осуществляется на границе керамической пластины, где они достигают  $\max$ , и в наиболее простой форме сводится к определению  $\sigma$  из уравнения /1/ при условии, что в качестве  $\epsilon$  выбирается величина недопущенной усадки поверхностного слоя пластины, возникающая вследствие неравномерного распределения влагосодержания по толщине пластины в процессе сушки. Распределение влагосодержания по толщине пластины получено из решения уравнения Фурье для неограниченной однородной пластины, толщиной  $2R$  при граничных условиях второго рода и коэффициенте диффузии, зависящем от времени.

$$U(z,t) - U_0 = \frac{jt}{\rho R} - \frac{2j}{\rho R} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos \frac{n\pi z}{R} \int_0^t \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2}{R^2} \left( \int_0^t a_m(\tau) d\tau - \int_0^t a_m(t) dt \right)\right] d\theta$$

На основе вышеизложенного разработана методика расчета поверхностных напряжений керамической пластины в первом периоде сушки, в которой использованы полученные значения коэффициентов диффузии влаги и реологических характеристик.

Расчет и анализ поверхностных напряжений для пластин из различных керамических материалов при изменении интенсивности сушки, температуры, начального влагосодержания и структуры материала позволил установить, что для материалов типа золокерамических шихт особенности структуры /скачкообразное уменьшение меры усадки  $\beta$  в первом периоде/ благоприятно сказываются на поверхностных напряжениях /рис. 4/. Для материалов типа кальмиусских флотохвостов интенсификация процесса сушки без ухудшения качества изделий возможна за счет увеличения интенсивности сушки. Для керамических материалов с величиной  $m \leq 0,6\%$  возникающие в процессе сушки напряжения не превышают предельно допустимые в области высоких интенсивностей сушки до  $j = 2,0 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ , что позволило рекомендовать для таких материалов проведение форсированных режимов сушки с  $j = 1,6-1,7 \text{ кг/м}^2\text{ч}$  без ухудшения качества изделий. В пятой главе изложены метод расчета допустимой интенсивности сушки в первом периоде и способ оценки сушильных свойств керамических материалов и определения рационального состава керамической шихты, позволяющие интенсифицировать процесс сушки для определенного класса керамических материалов и получать керамические шихты с оптимальными сушильными свойствами.

Метод расчета допустимой интенсивности сушки основан на том, что для получения качественных изделий в процессе сушки необходимо, чтобы напряжения, возникающие в материале к концу первого периода сушки, не превышали предельно допустимые напряжения, которые соответствуют влагосодержанию материала в конце первого периода сушки. Рассчитаны величины максимально допустимой интенсивности сушки для золокерамической шихты и шихт из кальмиусских и череповецких флотохвостов, которые показали возможность проведения для этих шихт форсированных режимов сушки с интенсивностью до  $j = 1,7 \text{ кг/м}^2\text{ч}$  без ухудшения качества изделий из этих шихт. Разработанный метод в отличие от существующих позволяет учесть весь комплекс характеристик материала, что дает возможность применять его к реальным процессам сушки керамических материалов.

Для разработки способа оценки сушильных свойств керамических материалов и определения рационального состава керамической шихты проанализирован весь комплекс проведенных исследований процесса сушки керамических стройматериалов и установлено, что оптимальными сушильными свойствами,

малой чувствительность к сушке / $K_{\text{ч}}=80-170$  °C/ и достаточно высокой прочностью после обжига / $P=7,5$  МПа/ обладают керамические материалы с величиной  $m=0,35-0,80$  %. Сделанный вывод, а также вывод об аддитивности величины  $m$  для шихты по отношению к составляющим компонентам положены в основу разработанного способа.

Результаты расчета допустимых режимов сушки и рациональных составов шихт на основе глин различных месторождений приведены в таблице:

Таблица

Материал	$m, \%$	$C, \%$	$K_{\text{ч}}, \text{с}$	$j, \text{к}^2/\text{м}^2\text{ч}$	$P, \text{МПа}$
Калкаманская глина	1,05	27,0			
Ермаковская зола	0,09	73,0			
Золокерамическая шихта	0,35		200	1,7	15,0
Глина Корчеватского завода	0,90	66,0			
Лесс	0,40	24,0			
Зола	0,10	10,0			
Корчеватская шихта	0,70		110	0,80	12,5
Кальмиусские флотохвосты	0,93	80,6			
Зола	0,10	14,4			
Шамот	0,08	5,0			
Кальмиусская шихта	0,80		90	0,75	17,0
Глина Локосовского завода	0,85	84,0			
Шамот	0,10	15,0			
Опилки	4,10	3,0			
Шихта Локосовского завода	0,83		90	0,65	15,0

Результаты расчетов показали возможность использования золокерамических шихт и шихт на основе отходов углеобогащения и флотации руд в качестве сырья для производства строительных материалов. Метод расчета оптимального состава керамической шихты позволяет, в отличие от существующих, исключить эмпирический подход, более оперативно рассчитать состав шихты с оптимальными сушильными свойствами, и получить информацию о необходимом количественном изменении состава шихты в процессе производства. Внедрение результатов работы позволило интенсифицировать процесс сушки изделий без ухудшения их качества на 10-12 % и улучшить качество изделий, снизив на 40-60 % количество отбракованных изделий.

Общий экономический эффект от внедрения результатов изложенной работы на двух указанных заводах составляет 155 тыс.крб. в ценах до 1990 г.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Выбрана структурная характеристика – величина мономолекулярной адсорбции  $m$ , на основе которой проведена классификация исследуемых керамических материалов. Установлено, что для композиционных материалов состоящих из не взаимодействующих компонентов величина  $m$  является аддитивной по отношению к составляющим компонентам.
2. Установлена различная степень влияния температуры на коэффициент диффузии влаги в керамических материалах, характеризующихся различной величиной мономолекулярной адсорбции, и определена область значений этой характеристики, в пределах которой интенсификация процесса сушки для керамических материалов сопровождается значительным увеличением скорости внутреннего массопереноса.
3. Степенная зависимость коэффициента диффузии влаги от температуры материала  $D_m = D_{m20} (T/293)^n$  подтверждена для керамических материалов на основе отходов углеобогащения и флотации руд. Получена зависимость  $n$  от величины мономолекулярной адсорбции.
4. С помощью методов планирования эксперимента установлены общие закономерности изменения коэффициента диффузии влаги в керамических материалах. Основным фактором, влияющим на коэффициент диффузии влаги, является величина мономолекулярной адсорбции. Степень влияния влагосодержания материала и интенсивности сушки также существенно зависит от этой характеристики.
5. В результате исследования реологических свойств керамических материалов в процессе сушки установлены эффективные способы сокращения продолжительности сушки и увеличения прочности высушиваемых изделий.
6. Предложена макроскопическая модель и сформулированы основные уравнения для описания деформационных процессов, происходящих при сушке керамических строительных материалов.
7. Разработана методика расчета, рассчитаны поверхностные напряжения однородной керамической пластины в первом периоде сушки и проанализировано влияния на них меры усадки, температуры материала, интенсивности сушки и начального влагосодержания материала, что позволило оценить склонность различных видов керамических материалов к разрушению в процессе сушки и интенсифицировать процесс сушки для керамических материалов с  $m \leq 0,8 \%$ .
8. Установлена корреляционная связь между величиной мономолекулярной адсорбции и чувствительностью керамических материалов к сушке. Определена область значений величины мономолекулярной адсорбции  $0,35 \leq m \leq 0,8$ , соответствующая керамическим материалам с низкой

чувствительностью к сушке и высокой прочностью после обжига.

9. На основе проведенных исследований предложен метод определения максимально допустимой интенсивности сушки в первом периоде, позволяющий рекомендовать проведение форсированных режимов сушки с

$\dot{q} = 1,7-1,8 \text{ кг/м}^2\text{ч}$  для определенного класса керамических материалов.

10. Разработан способ оценки сушильных свойств керамических материалов и определения рационального состава керамической шихты, позволяющий получать керамические шихты с оптимальными сушильными свойствами и корректировать состав шихты в процессе производства. Разработанный способ позволил установить возможность использования отходов углеобогащения и флотации руд в качестве сырья для строительных материалов.

11. Предложенные методы позволили для определенных классов керамических материалов сократить продолжительность сушки, интенсифицировать процесс сушки и улучшить качество готовых изделий.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Пиевский И.М., Голубчикова В.В., Готкис А.И./Степанова А.И./.

Исследование сорбционных свойств системы глина-вода с добавками лигносульфоната кальция. - В кн.: Научные основы технологии и развития производства стеновой строительной керамики. Киев: Наукова думка, 1972, с.86-89.

2. Пиевский И.М., Гречина В.В., Мендрул А.А., Степанова А.И. Способ определения коэффициента диффузии влаги в изотропных КИП материалах - Строительные материалы, 1983, 2, с.20.

3. Пиевский И.М., Гречина В.В., Назаренко Г.Д., Степанова А.И. Сушка керамических строительных материалов пластического формования Киев: Наукова думка, 1985, 140 с.

4. Пиевский И.М., Гречина В.В., Степанова А.И., Хоменко А.С. Влияние гидрофильности на массообменные и усадочные характеристики каолинов - Промышленная теплотехника, 1980, 1, с.54-57.

5. Пиевский И.М., Гречина В.В., Степанова А.И., Хоменко А.С. Влияние структуры материала на внутренний массоперенос в глинах. - Промышленная теплотехника, 1986, 3, с.74-76.

6. Пиевский И.М., Гречина В.В., Степанова А.И. Взаимосвязь массообменных и сорбционных свойств керамических дисперсий. В кн.: Технические суспензии и их применение в народном хозяйстве. Тезисы докладов Всесоюзного семинара. Киев, декабрь, 1984, Киев: Наукова думка.

7. Гречина В.В., Степанова А.И. Некоторые закономерности внутреннего массопереноса при сушке керамических стройматериалов. В кн.: Тезисы докладов Республиканской Научно-технической конференции "Разработка

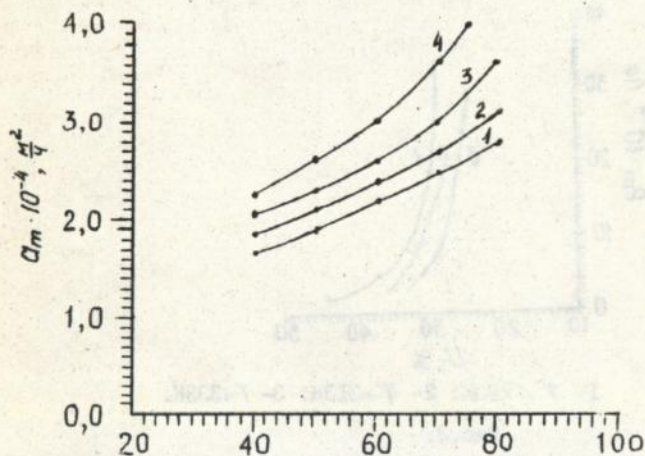
- прогрессивных способов сушки различных материалов и изделий на основе достижений теории тепло- и массообмена", Черкасы, сентябрь, 1987.
8. Пиевский И.П., Панасевич А.А., Гречина В.В., Готкис А.И./Степанова А.И./ Установка для определения реологических характеристик консистентных глинистых масс при температурах до 100 °С. - В кн.: Инструментальные методы реологии /Москва, сентябрь, 1977/. Семинар, тезисы докл. М.: ЭДНХ СССР, 1977, с. 15-16.
9. Пиевский И.М., Голубчикова В.В., Готкис А.И./Степанова А.И./ Исследование вание реологических свойств глинистых систем при различных влажностях и температурах в присутствии ПАВ. - В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по теплообмену. Минск: Изд-во АН БССР, 1972, с. 163-164.
10. Пиевский И.М., Готкис А.И./Степанова А.И./ Голубчикова В.В. Исследование пластической прочности лесса и суглинка. - В кн.: Научные основы технологии и развития стеновой строительной керамики. Киев: Наукова думка, 1972, с. 177-179.
11. Готкис А.И./Степанова А.И./ Голубчикова В.В. Определение предельных напряжений сдвига керамических масс при температуре до 100 °С. - В кн.: Труды I Украинской конференции по научным основам, технологии производства строительной керамики. Киев, СОПС УССР, 1970, с. 50-53.
12. Хорьков П.Н., Бурмистров В.Н., Карпушина Т.И., Гречина В.В., Степанова А.И. Исследование сушильных свойств отходов флотации углей. - В кн.: Повышение качества и расширение ассортимента керамических стеновых изделий и дренажных труб. Москва: ВНИИСТРОМ им. Будникова, 1984, с. 21-27.
13. Бурмистров В.Н., Карпушина Т.И., Гречина В.В., Степанова А.И. Особенности сушильных свойств отходов флотации углей. - Строительные материалы, 1985, с. 18-19.
14. Бурмистров В.Н., Карпушина Т.И., Степанова А.И. Особенности структурно-механических свойств флотации углей. - В кн.: Технические и технологические исследования в области керамических стеновых изделий и дренажных труб. Сборник трудов. М.: ВНИИСТРОМ им. Будникова, 1985, с. 35-40.
15. Сайбулатов С.Ж., Пиевский И.М., Степанова А.И., Нурбаторов К.А. Исследование реологических свойств и напряженного состояния золотиняных керамических масс в процессе сушки. - Промышленная теплотехника, 1982, 3, с. 62-65.
16. Гречина В.В., Степанова А.И. Влияние гидрофильности на реологические свойства дисперсных материалов. - Промышленная теплотехника;

1980, 5, с. 68-71

17. Пиевский И.М., Голубчикова В.В., Готкис А.И./Степанова А.И./, Духненко Н.Т. Изучение кинетики напряженного состояния поверхностного слоя пластины в процессе сушки.- В кн.: Труды Республиканской конференции по теплопроводности и диффузии в технологических процессах. Рига: 1976, с. 74-78.
18. Пиевский И.М., Готкис А.И./Степанова А.И./, Голубчикова В.В. Исследование кинетики напряженного состояния поверхностного слоя кирпича в процессе сушки.- В кн.: Теплообмен и гидродинамика. Киев: Наукова думка, 1977, 33, с. 86-92.
19. Гречина В.В., Готкис А.И./Степанова А.И./. Влияние параметров сушки и свойств материала на напряжения в поверхностном слое пластины.- В кн.: Труды Всесоюзной конференции по интенсификации процессов сушки и использование для этих целей новой техники. Калинин, 1977, с. 18.
20. Пиевский И.М., Гречина В.В., Готкис А.И./Степанова А.И./. Влияние релогических характеристик, температуры материала и интенсивности тепломассообмена на кинетику напряженного состояния поверхностного слоя тонкой пластины.- ДАН УССР, серия А, 1978, I, с. 62-85.
21. Степанова А.И. Исследование поверхностных напряжений керамической пластины в процессе сушки и выбор оптимального режима сушки.- В кн.: Дальнейшее совершенствование теории, технологии и техники сушки. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Чернигов, 1981, секция II. Минск: Изд-во ИТМО БССР, 1981, с. 266.
22. Степанова А.И. Расчет поверхностных напряжений керамической пластины в процессе сушки.- Промышленная теплотехника, 1982, 2, с. 54-59.
23. Пиевский И.М., Голубчикова В.В., Готкис А.И./Степанова А.И./. Сравнительная оценка сушильных свойств керамических масс на основе усадочных и структурно-механических характеристик.- В кн.: Теплофизика и теплотехника. Киев: Наукова думка, 1974, 28, с. 84-87.
24. Kremnev O.A., Pievsky I.M., Grechina V.V., Gotkis A.I./Stepanova A.I./ Untersuchung des Trocknungsverhaltens keramischer Massen in Abhängigkeit von der strukturellen charakteristik des Systems. 7 Internationale Baustoff und Silikattagung, Weimar, 1979, s. 47-52.
25. Kremnev O.A., Pievsky I.M., Grechina V.V., Nazarenko G.D., Stepanova A.I. Ausarbeitung economischer Trocknungseinrichtungen auf der Grundlage optimaler technologischer Eigenschaften der keramischen Masse. 8 Internationale Baustoff und Silikattagung, Weimar, 1982, s. 103-108.

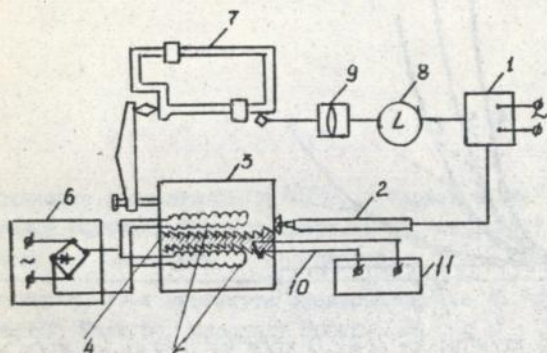
- 26. Пиевский И.М., Гречина В.В., Назаренко Г.Д., Степанова А.И. Интенсификация процесса сушки керамических стройматериалов на основе оптимизации состава сырья. - В кн.: Сборник трудов по сушке Университета Мак-Гилла, Монреаль, Канада, 1985.
- 27. Пиевский И.М., Гречина В.В., Степанова А.И., Пекерман М.Е., Бурмистров В.Н. Способ определения рационального состава керамической шихты. - Строительные материалы, 1986, 2, с.29.

Влияние температуры теплоносителя на коэффициент диффузии влаги в материале



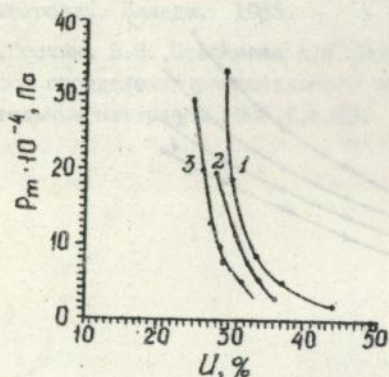
1-  $m = 0,60\%$ ; 2-  $m = 0,50\%$ ; 3-  $m = 0,45\%$ ;  
4-  $m = 0,40\%$ . Рис. I.

Схема установки для исследования реологических характеристик керамических материалов



1- самописец; 2- датчик горизонтальных перемещений;  
3- рифленные разъемные пластины; 4- образец; 5- спиральные нагреватели; 6- выпрямитель; 7- рычажная система с грузами; 8- электрический секундомер; 9- выключатель; 10- термолара; 11- электронный потенциометр.

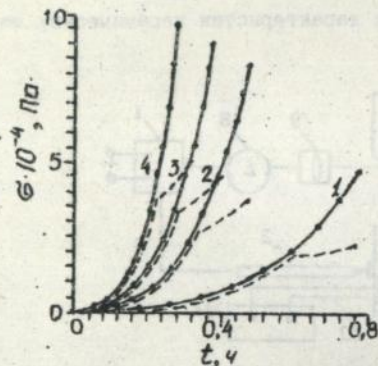
Влияние температуры материала  
на пластическую прочность спондилитовой глины



1-  $T = 293\text{K}$ ; 2-  $T = 313\text{K}$ ; 3-  $T = 333\text{K}$ .

Рис.3.

Кинетика напряженного состояния поверхностного слоя  
золокерамической пластины в процессе сушки



1-  $j = 0,5 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ ; 2-  $j = 1,0 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ ; 3-  $j = 1,26 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ ;  
4-  $j = 1,62 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ ; сплошные кривые-  $\delta = 0,2$ ;  
штриховые-  $\delta = 0,02$ .

Рис.4.

Подписано к печати 03.08.1994г. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная Усл.-печ.лист. 1,0. Уч.-изд.лист 1,0.  
Тираж 100. Заказ 393. Бесплатно

---

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины  
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

и сир...

**AB 31.280**