

53  
А-65

636/-

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР

КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. А.М. ГОРЬКОГО

На правах рукописи

АНДРИАНОВ  
Виктор Михайлович

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА  
ВО ВЛАЖНЫХ ТВЕРДЫХ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЛАХ ПРИ  
ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

01.04.15 - Молекулярная физика

23

Диссертация написана на русском языке

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

К и е в - 1973

НБ НПУ

імені М.П. Драгоманова



100310682

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР

КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. А.М. ГОРЬКОГО

---

На правах рукописи

АНДРИАНОВ  
Виктор Михайлович

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА  
ВО ВЛАЖНЫХ ТВЕРДЫХ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЛАХ ПРИ  
ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

01.04.15 - Молекулярная физика

Диссертация написана на русском языке

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук:

К и е в - 19.3

Работа выполнена на кафедрах физики Киевского государственного педагогического института им. А. М. Горького и Винницкого государственного педагогического института им. Н. А. Островского

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук, доцент В. П. ДУЩЕНКО

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук, профессор  
КАЗАНСКИЙ М. Ф.
2. Кандидат физико-математических наук, доцент  
ВЕНЕДИКТОВ М. В.

Ведущее предприятие - Киевский инженерно-строительный институт, кафедра физики

Автореферат разослан "20" апреля 1973 г.

Защита состоится "13" июня 1973 г. в 14 час.

на заседании Ученого Совета физико-математического факультета Киевского государственного педагогического института им. А. М. Горького /252030, Киев-30, ГСП, ул. Пирогова, 9/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

кандидат физико-математических наук.

Д О Ц Е Н Т

И. И. ТЫЧИНА

Значительное количество материалов, используемых в народном хозяйстве, представляют собой влажные твердые дисперсные системы. Вопросы внутреннего теплопереноса и исследование теплофизических свойств влажных и мерзлых твердых дисперсных систем имеют большое научное и практическое значение и являются одним из важнейших разделов современной молекулярной физики дисперсных систем.

Установлено, что одним из главных факторов, определяющих теплофизические свойства твердых дисперсных систем является влагосодержание. Появление льда во влажных твердых дисперсных системах приводит к сложной перестройке их структуры и свойств, в том числе и теплофизических свойств. Влажные и, в особенности, мерзлые твердые дисперсные системы являются многокомпонентными, многофазными системами. Выполнение с достаточной степенью точности теоретического расчета теплофизических свойств таких систем в широком интервале влагосодержаний и температур при современном уровне знаний не представляется возможным. Поэтому, как указывает А.Ф.Чудновский, решающая роль в разрешении этой сложной задачи внутреннего теплопереноса во влажных и мерзлых твердых дисперсных системах должна принадлежать всестороннему и углубленному эксперименту.

Фундаментальный вклад в развитие молекулярной теплофизики твердых дисперсных систем внесли выдающиеся советские ученые А.В.Лыков, А.Ф.Чудновский, Г.М.Кондратьев, Г.Н.Дульнев и другие. Большое значение в исследовании теплофизических свойств талых и мерзлых твердых дисперсных систем сыграли работы М.Ф.Казанского, А.У.Франчука, Н.С.Иванова, Р.И.Гаврильева, М.М.Голянда, а также М.Керстена, О.Кришера, Л.Хигаси и других ученых.

Однако, как показывает обзор современных исследований, теплофизические свойства промерзающих и мерзлых твердых дисперсных систем, несмотря на их важное значение, остаются еще малоисследованными. Последнее объясняется тем, что исследование теплофизических свойств мерзлых твердых дисперсных систем представляет значительные акси-

риментальные трудности, характеризующие спецификой мерзлого состояния твердых дисперсных систем и уровнем развития теплофизического эксперимента. Отсутствие стандартных теплофизических установок и единства теплофизических измерений при изучении теплофизических свойств мерзлых твердых дисперсных систем приводит к значительным разбросам результатов измерений, достигающих в отдельных случаях 200-300%.

Результаты исследований теплофизических свойств мерзлых твердых дисперсных систем приводят без учета их структурно-геометрических и дифференциальных водоудерживающих свойств, а также без связи с количеством незамерзшей воды /льдистости/ в них. Это не дает возможности проводить систематизацию, сравнение и обобщение экспериментальных данных теплофизических свойств мерзлых твердых дисперсных систем и таким образом в значительной степени обесценивает их.

Быстро развивающееся освоение огромных территорий вечной мерзлоты, связанное с проблемами геокриологии, агрофизики, почвоведения, инженерного дела, применение в строительстве прогрессивных методов замораживания грунтов, добыча и разведка полезных ископаемых, развитие новых методов обработки термолабильных тел /сублимационная сушка/ и т.п. требуют дальнейшего расширения и углубления знаний теплофизических свойств мерзлых твердых дисперсных систем. Необходимо отметить, что за последнее время исследования в области теплофизических свойств мерзлых твердых дисперсных систем усилились. Глубокие исследования теплофизических свойств горных пород проводятся в Теплофизической лаборатории Института мерзлотоведения СО АН СССР, на кафедре мерзлотоведения МГУ и в других организациях страны. Однако исследования теплофизических свойств промерзающих и мерзлых твердых дисперсных систем и в настоящее время представляет одну из актуальных задач современной теплофизики дисперсных систем. Это зафиксировано в решениях ряда конференций и совещаний, проводившихся в нашей стране.

в частности в решениях Конференции по современным проблемам строгательной теплофизики /Москва, 1954/, 8-го Межведомственного совещания по геокриологии /Якутск, 1966/, Всесоюзных совещаний по тепло- и массовому обмену /Минск, 1961, 1964, 1968, 1972/ и ряда других.

В настоящей диссертации изложены результаты экспериментального исследования зависимости теплофизических свойств /коэффициентов тепло- и температуропроводности, удельной теплоемкости/ типичных образцов основных видов влажных твердых дисперсных систем от влагосодержания с учетом их структурно-геометрических и дифференциальных водоудерживающих свойств при отрицательных /263-243 К/, а также положительных /293-333 К/ температурах.

Сравнение теплофизических свойств влажных твердых дисперсных систем при положительных и отрицательных температурах позволило более детально установить специфичность внутреннего теплопереноса при отрицательных температурах для областей гигроскопического и влажного состояний и выявить роль форм связи и состояний поглощенной влаги.

В работе также изучены криогенные свойства /количество незамерзшей воды при разных отрицательных температурах, температуры кристаллизации поровой влаги/, которые использованы при подготовке образцов и выборе температурных интервалов исследования, а также при анализе зависимости теплофизических свойств исследуемых объектов от влагосодержания.

Диссертация содержит примеры теоретического расчета эффективных коэффициентов теплопроводности систем: кварцевый песок-воз. ух, а также водонасыщенных систем - кварцевый песок - вода, кварцевый песок-лед и сопоставление расчетных данных с экспериментальными.

Учитывая сложность процессов промерзания влажных твердых дисперсных систем, в работе приведен пример анализа кинетики температурных полей промерзания типично го капиллярнопористого водонасыщенного тела /кварцевый песок/, в котором сопоставляются опытные данные с результатами моделирования на аналоговой вычислительной машине СДМ-3.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений, соответственно изложенных на 121 странице машинописного текста, 36 рисунках /29 страниц/, 14 таблицах /14 страниц/. Список литературы включает 232 работы /20 страниц/ отечественных и зарубежных авторов.

## I.

В первой главе /стр.4-44/ приводится современная классификация влажных твердых дисперсных систем по акад. АН БССР А.В.Лыкову, которая включает их основные виды: капиллярнопористые, коллоидные и коллоидные капиллярнопористые тела, а также анализ параметров основных структурно-геометрических свойств твердых дисперсных систем и методов их определения. На основе анализа методов изучения пористой структуры твердых дисперсных систем нами выбраны для изучения макropоровой структуры метод "первого пузырька" и для изучения микropоровой структуры метод капиллярной конденсации с использованием вакуумных сорбционных весов.

Приводится обзор современных взглядов на формы связи влаги с твердой фазой твердых дисперсных систем. Детально рассмотрено, как наиболее удовлетворяющее современной молекулярной физике твердых дисперсных систем, учение о формах и видах связи влаги с материалами, развитое в работах П.А.Ребиндера, С.М.Липатова, А.В.Думанского, А.В.Лыкова, Ф.Д.Овчаренко и других. Рассмотрены также классификации форм влаги в мерзлых грунтах Э.А.Нерсесовой, И.А.Тютюнова и других.

На основе анализа методов изучения дифференциальных водоудерживающих свойств твердых дисперсных систем нами в работе использовались методы изотерм сорбции-десорбции с помощью вакуумных сорбционных весов и метод термограмм сушки по М.Ф.Казанскому, как наиболее надежные и эффективные.

Общая теория криогенного состояния твердых дисперсных систем в настоящее время еще не разработана. Наиболее изученными являются

криогенные состояния горных рыхлых пород и грунтов в мерзлотоведении, откуда нами заимствованы некоторые основные понятия и представления /принцип равновесного состояния воды и льда в мерзлых твердых дисперсных системах, учение о незамерзшей воде, криогенной структуре и текстуре, закономерности фазовых превращений поровой влаги в лед и т.п./. Выполнению работы в значительной степени способствовали успехи, достигнутые в нашей стране при изучении физических и физико-химических явлений и процессов в промерзающих и мерзлых горных породах, освещенные в работах Н.А.Цытовича, А.Е.Федосова, А.А.Ананяна, Э.А.Нерсесовой, Б.Н.Достовалова, А.П.Божиновой, О.А.Самойлова, П.А.Шумского, Б.А.Савельева, Г.А.Мартынова, А.М.Пчелинцева и ряда других ученых.

Решающим признаком мерзлого состояния твердых дисперсных систем является наличие льда в них. Появление льда в твердых дисперсных системах коренным образом меняет их физические и физико-химические свойства. Эти свойства оказываются зависящими не только от общего количества льда в твердых дисперсных системах, но также и от формы, размеров и размещения ледяных включений, то есть от криогенной структуры и текстуры мерзлой твердой дисперсной системы. В зависимости от вида твердых дисперсных систем, степени ее водонасыщения, скорости заморзания и прочих факторов в мерзлой твердой дисперсной системе возникают особые кристаллически-зернистые структуры, получившие название льда-цемента. Касаясь современного состояния вопроса о льде-цементе необходимо отметить его недостаточную изученность. Так, еще не установлены количественные соотношения между различными типами льда-цемента на разных стадиях улаживания, их зависимость от давления, температуры и прочих факторов для разных типов твердых дисперсных систем.

Как установлено экспериментально, при замораживании влажных твердых дисперсных систем не вся вода в них замерзает при 273 °С. Зна-



ние количества незамерзшей воды в мерзлых твердых дисперсных системах позволяет установить не только области фазового состояния системы, но также рассчитывать некоторые теплофизические свойства твердых дисперсных систем в области фазовых превращений, трактовать явления внутреннего теплопереноса и др.

Здесь же значительное внимание уделено современным термодинамическим и молекулярно-кинетическим представлениям о фазовых переходах при замерзании свободной и связанной поровой влаги в твердых дисперсных системах. При этом учитываются новейшие взгляды на природу свободной и связанной воды, развиваемые в работах советских и зарубежных ученых.

## II.

Во второй главе /стр.44-86/ приводятся краткие характеристики параметров внутреннего теплопереноса /коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $\alpha$ , удельной теплоемкости  $C$  / для промерзающего и мерзлого состояний твердых дисперсных систем, а также для влажного состояния при положительных температурах.

Здесь также приводится критический обзор современных методов измерения теплофизических свойств и криогенных свойств твердых дисперсных систем; метрологическая значимость опытного обеспечения крайних условий, описание некоторых экспериментальных установок и оценка точности методов измерений.

Из значительного многообразия методов измерения теплофизических свойств твердых дисперсных систем для положительных и отрицательных температур нами выбраны как наиболее отвечающие задачам исследования внутреннего теплопереноса в мерзлых твердых дисперсных системах методы регулярного теплового режима /по Кондратьеву/ и метод 2-х температурно-временных интервалов, разработанный В.С.Волькенштейн и модифицированный применительно к исследованиям влажных твердых дисперсных систем М.Ф.Казанским и его учениками.

Использование различных методов исследования позволяет повысить степень объективности и надежности информации о теплофизических свойствах мерзлых твердых дисперсных систем.

Нам был разработан и смонтирован комплекс измерительных установок, которые позволяют проводить как изучение теплофизических свойств мерзлых и талых твердых дисперсных систем, так и их криогенных свойств /количества незамерзшей воды, температур кристаллизации поровой влаги/, а также изучение температурных полей промерзания во влажных твердых дисперсных системах.

Основу этого комплекса составляют два идентичных криостатных стенда, разработанных нами и смонтированных на базе ультратермостатов ТЛ-150. С помощью размещенного в криостатной жидкости /спирт/ эвиевика, по которому прокачивается фреон 12 от холодильного агрегата ФАК-07, обеспечивается получение отрицательных температур до 233 К. Использование фототитратронного терморегулятора, управляющего работой нагревателей, позволяет поддерживать точность криостатирования не хуже  $\pm 0,005$  К в диапазоне температур  $\pm 13-273$  К.

На базе таких криостатов реализуются используемые методы измерений теплофизических свойств и криогенных свойств твердых дисперсных систем.

Измерение коэффициента  $\alpha$  мерзлых твердых дисперсных систем проводилось методом регулярного режима I-го рода /по Кондратьеву/ с использованием медных тонкостенных акалориметров. При этом один из криостатов служил для предварительного охлаждения /криостатирования/ акалориметров, а другой - для измерений.

Измерение коэффициента  $\lambda$  проводилось методом цилиндрического бикалориметра, теория которого развита в работах Г.М.Кондратьева и А.Ф.Чудновского, а разработка установки и методики измерений дана М.Ф. Казанским, а также В.А.Осиповой и Л.А.Поповым.

При этом значительное внимание было уделено вопросам строгости

обеспечения граничных условий.

Для измерения температур охлаждения /нагревания/ нами разработана и внедрена схема автоматической записи изменения температуры на диаграммную ленту электронного потенциометра ЭПД 09 ЗМ. В качестве датчика температуры использовался малоинерционный термометр сопротивления /  $R = 40 \text{ Ом}$  при  $T = 293 \text{ К}$ /.

Автоматическая запись температур охлаждения /нагревания/ позволяет проводить одновременные измерения с несколькими калориметрами, а при использовании составного бикалориметра производить одновременное определение коэффициентов  $\lambda$  и  $\alpha$ .

Принимая во внимание значительную трудоемкость измерений теплофизических свойств мерзлых твердых дисперсных систем, последнее усовершенствование способствует заметному ускорению теплофизического эксперимента.

Определение точности методов регулярного режима проводилось на основе современных метрологических требований, предъявляемых к теплофизическому эксперименту. При этом доверительная вероятность выбиралась 0,95, а обработка результатов измерений велась с учетом распределения Стьюдента. Точность измерений коэффициентов  $\alpha$  и  $\lambda$  для твердых дисперсных систем составляет соответственно 3,5% и 5,4%.

Установка по методу регулярного режима предварительно проверялась с помощью стандартного образца теплофизических свойств - полиметилметакрилата, полученного из ВНИИМ /Свидетельство № 64/ГУ/. Расхождение между данными ВНИИМ и нашими измерениями коэффициента  $\alpha$  составило 0,9%.

Наличие криостатных установок позволило, как нам известно, впервые применить метод 2-х температурно-временных интервалов для изучения теплофизических свойств мерзлых твердых дисперсных систем. В данном случае термодатчик /эталон/ с измерительной ячейкой монтировался в специально разработанной воздушной камере, которая размещалась внутри криостата. Для охлаждения образцов в ходе эксперимен-

та использовался жидкостный холодильник, через который интенсивно прокачивалась термостатная жидкость из второго криостата. Использование жидкостных криостатов и обеспечение хороших промежуточных тепловых контактов между холодильником и исследуемым веществом, а также между веществом и эталоном позволило достаточно строго выдерживать граничные условия метода. Оценка точности метода, проведенная с использованием распределения Стьюдента, оказалась равной для коэффициента  $\alpha$  - 3,2%, а для коэффициента  $\lambda$  - 5,7%. Расхождение данных измерений коэффициента  $\alpha$  образца полиметилметакрилата плотностью  $\gamma = 1194 \text{ кг/м}^3$  при температуре 263 К с литературными данными не превышает 2%.

Удельная теплоемкость скелета твердых дисперсных систем  $C$  широко используется для расчетов теплофизических свойств, а также для определения количества незамерзшей воды. Однако литературные данные о  $C$  в большинстве случаев относятся к области положительных температур. При отрицательных температурах данных об  $C$  твердых дисперсных систем еще крайне недостаточно. Это приводит к тому, что во многих случаях не учитывается температурная зависимость удельной теплоемкости  $C=f(T)$ . Однако такое допущение возможно с известными оговорками и только для небольших интервалов температур. В связи с этим нами проведено исследование истинных удельных теплоемкостей засыпок сухих типичных твердых дисперсных систем в интервале температур 123-293 К.

Измерения производились на установке лаборатории теплофизики Винницкого пединститута, смонтированной по принципу термографического анализа /по Барскому/. Установка калибровалась по  $\alpha$ -корунду - образцовому калориметрическому веществу /ВНИИ, Ленинград/. Расхождения между рекомендуемыми значениями и данными наших измерений в области температур 253-293 К не превышает 2%. Величина  $C$  для жидкого и твердого состояний рассчитывалась по аддитивной формуле, с учетом для твердых состояний количества незамерзшей воды. Коэффи-

коэффициент  $\lambda$  определялся также косвенным образом, на основании данных коэффициента  $A$  и величины  $C_T$  по формуле  $\lambda = AC_T$ . Максимальное расхождение между прямым и косвенным методами определения коэффициента  $\lambda$  не превышает 10%.

Измерение количества незамерзшей воды производилось методом изотермического калориметра /по Э.А.Нерсесовой/. Установка смонтирована на базе ультратермостата ТЛ-150 и модифицирована. В частности повышена точность термометрических измерений за счет применения отсчетного микроскопа. Усовершенствована методика переноса кристатурируемых образцов в калориметр. Разработанный акустический датчик сигналов времени для термометрических отсчетов упростил работу на установке. Установка в режиме измерений удельной теплоемкости проверялась по стандартному образцовому веществу  $\alpha$  - корунду /ВНИИМ/. Расхождение между рекомендуемыми значениями и данными измерений  $C$  при температуре 293 К составили 1%.

Измерение количества незамерзшей воды проводилось в цикле оттаивания при температуре калориметрической жидкости 293 К.

На основе криостатных установок была смонтирована установка по измерению температур кристаллизации поровой влаги в твердых дисперсных системах /по А.П.Боженовой/. Запись процессов замораживания поровых растворов твердых дисперсных систем производилась на диаграммную ленту ЭП 09 ЭМ, чувствительность которого была значительно повышена. Для повышения точности измерения температуры и контроля работы автоматического потенциометра ЭП 09 ЭМ использовался одновременно потенциометр Р 306.

### III.

В третьей главе /стр.89-104/ приводится обоснование выбора объектов исследования, как типичных образцов основных видов влажных твердых дисперсных систем, и результаты изучения некоторых определяющих их физических и физико-химических свойств.

В качестве модельного капиллярнопористого тела с жесткой макропористой структурой и однородной физико-механической формой связи влаги с твердой фазой тела был выбран кварцевый песок Глуховецкого каолинового месторождения, дисперсности  $0,25-0,50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  с наиболее вероятным размером пор  $0,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и размером частиц  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Кварцевый песок имеет плотность  $2630 \text{ кг/м}^3$  и при выбранной начальной объемной массе  $\gamma_0 = 1400 \text{ кг/м}^3$  обладает пористостью  $46,8\%$ . Адсорбционно связанная влага кварцевого песка  $W_c = 0,1\%$ , а максимальная молекулярная влагоемкость /по Лебедеву/ составляет  $W_{\text{макс}} = 0,5\%$ . При влагосодержании ниже  $W_{\text{нм}} = 5,3\%$  происходит переход влаги в пленочно-менисковое состояние, а при  $W_c = 0,83\%$  совершается разрыв сплошности водной среды вдоль пленок на поверхности зерен, и при этом влага переходит в менисковое состояние.

В качестве модельного капиллярнопористого коллоидного тела был выбран глуховецкий каолин. Глуховецкий каолин является типичным образцом глиноземистых минералов, мономинеральной глиной, содержащей до  $98\%$  каолинита. Высокое совершенство кристаллической структуры и жесткая связь пакетов глуховецкого каолина объясняют его сравнительно незначительные водопоглощающие свойства. Плотность глуховецкого каолина равна  $2595 \text{ кг/м}^3$ , а начальная объемная масса засыпок выбрана равной  $\gamma_0 = 850 \text{ кг/м}^3$ . Гранулометрический анализ глуховецкого каолина проводился полудисперсным методом. По своим структурно-геометрическим свойствам глуховецкий каолин может быть отнесен к неоднороднопористым материалам с незначительным количеством микропор. Сравнительно низкая удельная поверхность глуховецкого каолина  $S_0 = 55 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{кг}$  объясняется тем что глуховецкий каолин не имеет ультрапор.

По данным измерений дифференциальных вододерживающих свойств глуховецкий каолин можно отнести к коллоидным капиллярнопористым телам с физико-химической формой связи влаги. Для глуховецкого каолина влага монослоя  $W_m = 1,2\%$ , адсорбционно связанная влага

$W_a = 2,2\%$ , максимальная гигроскопическая влагоемкость  $W_{гг} = 9,7\%$ , влага набухания  $W_n = 42\%$ , что отвечает общей пористости  $48,0\%$ , максимальная молекулярная влагоемкость  $W_{ммб} = 31,0\%$ .

Группа эластичных гелей, типичных коллоидных тел представлена естественным высокополимером - картофельным крахмалом. Плотность картофельного крахмала равна  $1642 \text{ кг/м}^3$ , начальная об'емная масса засыпок картофельного крахмала выбрана равной  $\gamma_0 = 650 \text{ кг/м}^3$ . Картофельный крахмал, благодаря своей структуре обладает высокими гидрофильными свойствами. По данным измерений дифференциальных вододерживающих свойств картофельного крахмала влагосодержание монослоя составляет  $W_m = 14,2\%$ , адсорбционно связанная влага  $W_a = 30,0\%$ , максимальная гигроскопическая влага  $W_{гг} = 44,0\%$ . Максимальная молекулярная влагоемкость /по Лебедеву/  $W_{ммб} = 52,0\%$ .

Приводятся результаты исследований криогенных свойств типичных твердых дисперсных систем. Данные температурной зависимости  $W_{нс} = f(T)$  незамерзшей воды от температуры /табл. 1/ рассмотрены с учетом форм и видов связи влаги с материалами. По данным измерений  $W_{нс}$  область практически мерзлого состояния начинается для кварцевого песка с температуры  $271,7 \text{ К}$ , для глуховецкого каолина с  $265 \text{ К}$ , картофельный крахмал находится при температуре  $263 \text{ К}$  в переходной области.

Приводятся опытные результаты кинетики кристаллизации поровой влаги, представленные в координатах температура-время  $T = f(\tau)$  для образцов кварцевого песка, глуховецкого каолина, картофельного крахмала. Данные о температурах переохлаждения  $T_n$  и температурах начала замерзания  $T_{нс}$  рассматриваются в соответствии с формами и видами связи влаги с материалами. Для картофельного крахмала при влагосодержании  $W \approx 52\%$ , совпадающем с максимальной молекулярной влагоемкостью, установлено особое "стеклообразное" состояние, отмеченное другими исследователями для высоко гидрофильных глини-аскантелей /А.А. Ананян/.

Полученные данные о криогенных свойствах исследуемых образ-

Таблица I.

КОЛИЧЕСТВО

незамерзшей воды в некоторых типичных твердых дисперсных системах в зависимости от температуры

Твердая дисперсная система:	Количество незамерзшей воды /в %/ к весу сухой ТДС
	272,95:272,65:271,75:271,05:269,45:267,65: 263: 253: 243
	: : : : : : : : :

Кварцевый песок /0,25-0,50.10 <sup>-3</sup>	0,66	-	0,30	0,25		0,22	-	-	-
Глуховецкий каолин	35,4	13,0	6,5	3,6	-	2,7	1,6	1,2	0,2
Картофельный крахмал	-	56,3	54,6	53,6	47,5	-	46,2	41,8	39,0

цов твердых дисперсных систем использовали для подготовки их к теплофизическим измерениям, проведения расчетов величин удельной теплоемкости и анализе результатов зависимости теплофизических характеристик твердых дисперсных систем от влагосодержания и температуры.

Приводится описание методики обработки и подготовки образцов к различным видам исследований, а также результаты измерений удельной электропроводности и анализа водных вытяжек поровых растворов кварцевого песка и глуховецкого каолина.

Засыпка исследуемых образцов твердых дисперсных систем в би- и калориметре и измерительные ячейки производилась из расчета сохранения постоянства начальной объемной массы  $\gamma_0$ . С целью устранения неравновесных и метастабильных гидротермических состояний замораживание увлажненных образцов производилось в воздушном холодильном шкафу при температуре 253-263 К в течение 2-4 часов. Непосред-



ственно пере измерениями образцы криостатировались в течение 2-4 часов при температуре на 3 К ниже температуры измерительного криостата.

#### IV.

Четвертая глава /стр.108-137/ содержит анализ результатов измерений коэффициентов  $\lambda$  и  $\alpha$ , удельной теплоемкости  $C$  в зависимости от влагосодержания при положительных и отрицательных температурах.

Результаты измерений теплофизических характеристик влажных и мерзлых твердых дисперсных систем представлены в виде графиков  $\lambda=f(W)$ ,  $\alpha=f(W)$ ,  $C=f(W)$ ,  $C_T=f(W)$ ,  $C=f(T)$ , с учетом форм связи влаги с материалами и обобщают более 1000 различных теплофизических экспериментов.

Теплофизические характеристики кварцевого песка в области положительных температур определялись при 293 К. Для сухого кварцевого песка, с объемной массой засыпок  $\gamma_0 = 1400 \text{ кг/м}^3$  получены разными методами следующие средневзвешенные результаты теплофизических характеристик  $\lambda = 0,231 \text{ Вт / (м.К)}$ ,  $\alpha = 0,227 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $C = 726 \text{ Дж/(г.К)}$

При появлении воды в кварцевом песке явления внутреннего теплопереноса значительно усложняются, т.к. система становится трехфазной: твердые частицы, вода, воздух. Результаты измерений термофизических характеристик кварцевого песка в зависимости от влагосодержания приводятся и обсуждаются в работах А.В.Лыкова, А.Ф.Чудновского, А.У.Франчука и других авторов. Для анализа явлений теплопереноса во влажных твердых дисперсных системах представляют значительный интерес работы М.Ф.Казанского и его учеников, где впервые в наиболее отчетливом виде приводится рассмотрение явлений внутреннего теплопереноса в кварцевом песке с учетом форм и состояний поглощенной влаги.

Измерение истинной удельной теплоемкости засыпок сухого кварцевого песка было проведено для интервала температур 293-123 К. Зависимость  $C=f(T)$  для кварцевого песка аналогична плавленному кварцу; что

повидимому объясняется общим для них кремне-кислородным мотивом. Количественное различие их теплоемкостей объясняется различием структур.

Зависимости  $C=f(W)$ ,  $C_{\gamma}=f(W)$  для кварцевого песка при 293 К имеют практически линейный характер. Коэффициент  $\lambda$  для кварцевого песка обнаруживает монотонно возрастающий характер до величины влагосодержания  $W = 15\%$ , после чего наблюдается его относительное постоянство.

Исследования зависимости  $\alpha=f(W)$  обнаруживает для макрокапиллярно-пористых тел максимум, приходящийся на влагосодержание  $W = 6\%$ , что говорит о сильном влиянии влаги на коэффициент  $\alpha$ . Кварцевый песок содержит незначительное количество физико-химической формы связи поглощенной влаги  $W_a = 0,1\%$ , в связи с чем при  $W > W_a$  кварцевый песок находится в области влажного состояния. Рост влагосодержаний сопровождается слиянием отдельных водяных манжет в пленку, обволакивающую частицы кварцевого песка, и при  $W = 6,0\%$  теплоперенос происходит как по скелету кварцевого песка, так по жидкой и газообразной фазам, в связи с этим коэффициент  $\lambda$  возрастает, а коэффициент  $\alpha$  достигает при этом максимального значения. Дальнейшее повышение влагосодержания приводит, начиная с  $W = 8,0\%$ , к уменьшению коэффициента  $\alpha$ . Последнее вызвано тем, что кварцевый песок все более приближается к двухфазному состоянию твердая фаза - вода, скорость роста коэффициента  $\lambda$  уменьшается, а объемная теплоемкость при этом растет.

Приводятся данные измерений коэффициентов  $\lambda$  и  $\alpha$  при температурах 263, 253, 243 К в интервале влагосодержаний от сухого состояния до значений, близких к полному влагонасыщению.

Код кривых зависимостей  $\lambda=f(W)$ ,  $\alpha=f(W)$ ,  $C=f(W)$ ,  $C_{\gamma}=f(W)$  в основном подобен ходу зависимостей при положительных температурах. При замерзании поровой влаги в кварцевом песке, как показали его визуальные исследования, возникает лед-цемент, характеризующийся массивной текстурой.

Появление в кварцевом песке льда приводит к резкому улучшению тепловых контактов и возрастанию коэффициента  $\lambda$  т.к.  $\lambda_{л} \approx 4 \lambda_{в}$ .

Зависимости  $\lambda=f(W)$  имеют монотонно возрастающий характер с тенденцией к некоторому затуханию при значениях влагосодержаний /льди-стостей близких к полному насыщению.

Ход зависимостей  $\alpha=f(W)$  мерзлого кварцевого песка, показанный на рис. I, качественно подобен соответствующему ходу зависимостей при положительных температурах. Отличие состоит в количественном отношении. Так при влагосодержании  $W = 1,0\%$  коэффициенты  $\alpha$  для талого и мерзлого состояний совпадают  $\alpha_{т} = \alpha_{м}$ , а при  $W = 8-11\%$   $\alpha_{м} = 1,3 \alpha_{т}$ . Кривые  $\alpha(W)$  для мерзлого кварцевого песка имеют менее выраженный максимум и спад, чем в случае положительных температур. Последнее объясняется ходом зависимости  $\lambda=f(W)$ , которая для мерзлого кварцевого песка монотонно возрастает, в то время как теплоаккумулятивные

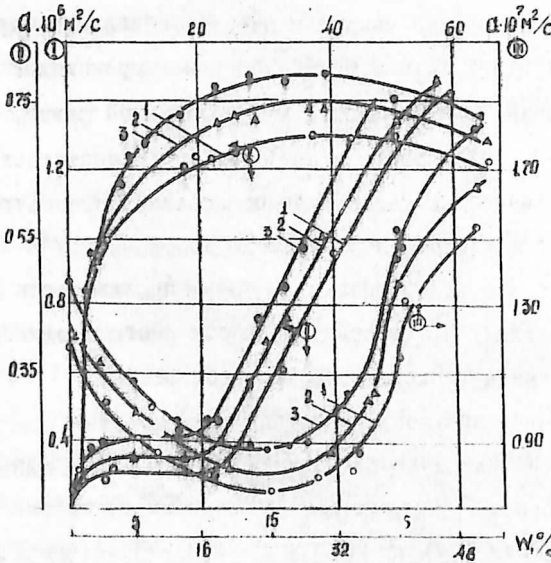


Рис. I. Зависимости коэффициента температуропроводности от влагосодержания для температур 263/1, 253/2, 243/3/ I. кварцевый песок, 2. глухов. каолин, 3. крахмал

свойства мерзлой системы с понижением температуры также понижаются. Незначительное возрастание коэффициентов  $\lambda$  и  $\alpha$  с понижением температуры мерзлого кварцевого песка объясняется увеличением коэффициента  $\lambda$  льда. Приводится сравнение полученных результатов с данными других авторов и высказываются соображения о причинах расхождений в отдельных случаях.

Термофизические характеристики глуховского каолина исследова-

лись при температурах 333, 313, 293 К, а также при 263, 253, 243 К.

В положительной области температур коэффициент  $\lambda$  имеет возрастающий характер. С возрастанием влагосодержания увеличение коэффициента  $\lambda$  объясняется главным образом за счет уменьшения тепловых сопротивлений контактов микроагрегатов. При этом на участке гигроскопического состояния системы /  $W = 0-10,0\%$  / коэффициент  $\lambda$  системы быстро растет. Дальнейшее увеличение коэффициента  $\lambda$  в области влажного состояния идет медленнее, т.к. насыщение водой глуховецкого каолина приближает его к двухфазному состоянию: скелет-вода и при этом коэффициент  $\lambda$  системы приближается к коэффициенту  $\lambda$  воды. На коэффициент влажного глуховецкого каолина заметное влияние оказывает температура: Так коэффициент  $\lambda$  увеличивается в интервале от сухого состояния до  $W = 25\%$  для 293 К в 4 раза, для 313 К в 3 раза и для 333 К в 7,5 раза.

Зависимости  $C=f(W)$ ,  $C_p=f(W)$  имеют для положительных температур нелинейный характер, который начинает сказываться после влагосодержаний  $W = 22,0\%$ , что связывается с некоторым набуханием глуховецкого каолина.

Кривые зависимостей  $\alpha=f(W)$  при положительных температурах имеют хорошо выраженный максимум, совпадающий со значением  $W_{нг} = 9,7\%$  и характерный для коллоидных капиллярнопористых материалов. При этом микропоры глуховецкого каолина заполнены водой вследствие капиллярной конденсации. При дальнейшем насыщении системы водой происходит замедление роста коэффициента  $\lambda$  и коэффициент  $\alpha$  соответственно начинает уменьшаться, т.к. объемная теплоемкость при этом растет.

Приводится температурная зависимость  $C=f(T)$  истинной удельной теплоемкости засыпок сухого глуховецкого каолина для интервала температур 293-133 К.

Зависимости  $C=f(W)$  для отрицательных температур имеют нелинейный характер.

Ход зависимости  $\alpha=f(W)$  глуховецкого каолина /рис. I/ позволяет

выделить 3 области изменения коэффициента  $\alpha$  : 1/ незначительного возрастания коэффициента  $\alpha$ ,  $W = 0-5,0\%$ ; 2/ относительного постоянства коэффициента  $\alpha$ ,  $W = 5,0-20,0\%$ ; 3/ область резкого возрастания коэффициента  $\alpha$ ,  $W = 20,0-48,0\%$ .

Показано, что наличие трех областей изменения коэффициента связано со спецификой кристаллохимических свойств глуховецкого каолина и особенностями формирования льда-цемента в относительно рыхлых засыпках глуховецкого каолина.

На участке влагосодержаний  $0-5,0\%$  незначительный прирост коэффициента  $\alpha$  вызван появлением в глуховецком каолине льда цемента. Дальнейшее увеличение льдистости глуховецкого каолина на участке влагосодержаний  $5-20,0\%$  сопровождается появлением микротрещин и разрывов. В связи с этим коэффициент  $\lambda$  растет весьма незначительно, а коэффициент  $\alpha$  сохраняет свое постоянство. На участке влагосодержаний  $20,0-48,0\%$  наблюдается резкое увеличение коэффициента  $\lambda$  и соответственно коэффициента  $\alpha$ . Последнее вызвано быстрым ростом удельного объема льда в глуховецком каолине, его самоуплотнением и улучшением тепловых контактов между микроагрегатами глуховецкого каолина. При этом коэффициент  $\alpha$  достигает максимальных значений  $7,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  /  $263 \text{ К}$ ,  $W = 45,0\%$ , что превосходит максимальные значения коэффициента  $\alpha$  в интервале положительных температур  $293-333 \text{ К}$ .

Приводятся результаты исследований теплофизических характеристик картофельного крахмала для температур  $293, 263, 253, 243 \text{ К}$  и их обсуждение. Зависимость  $\lambda = f(W)$  картофельного крахмала для  $293 \text{ К}$  обнаруживает 3 области изменения коэффициента  $\lambda$  : 1/ область относительного постоянства коэффициента  $\lambda$ ,  $W = 0-14,0\%$ ; 2/ область незначительного возрастания коэффициента  $\lambda$ ,  $W = 14,0-43,0\%$ ; 3/ область резкого возрастания коэффициента  $\lambda$ ,  $W = 43,0-70,0$ . Таким образом, изменения коэффициента  $\lambda$  картофельного крахмала определяются дифференциальными водоудерживающими свойствами. Незначительный рост

коэффициента  $\lambda$  на участке влагосодержаний 0-43,0% говорит о слабой роли связанной воды в развитии тепловых контактов.

Зависимости  $C=f(W)$  и  $C_f=f(W)$  практически линейны для 293 К. Коэффициент  $\alpha$  на участке влагосодержаний 0-40,0% уменьшается от значения  $0,113 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  до значения  $0,075 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , а на участке влагосодержаний 40,0-62,4% возрастает до значения  $0,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Приводится зависимость  $C=f(T)$  для засыпок сухого картофельного крахмала для температур 293-123 К, которая является в данном интервале температур практически линейной.

Зависимости  $C=f(W)$ ,  $C_f=f(W)$  при отрицательных температурах имеют нелинейный характер.

Зависимости  $\lambda=f(W)$ ,  $\alpha=f(W)$  картофельного крахмала при температурах 263, 253, 243 К обсуждаются на основе его дифференциальных вододерживающих свойств и криогенных свойств. Диссертантом установлено, что коэффициент  $\lambda$  при отрицательных температурах меньше чем при положительных в широком интервале влагосодержаний. Лишь при появлении в картофельном крахмале льда-цемента /  $W > 52\%$  / начинается резкое возрастание коэффициента  $\lambda$ .

Ход кривых  $\lambda(W)$  для разных температур обнаруживает некоторую термическую зависимость. Последнее можно объяснить следующим образом. Воду в картофельном крахмале можно рассматривать как своеобразный пластификатор. При понижении температуры происходит, очевидно, более упорядоченное размещение макромолекулярных цепей амилопектина, что приводит к уменьшению рассеивания теплового потока и в свою очередь увеличивает коэффициент  $\lambda$ .

Приводятся зависимости  $\alpha=f(W)$  картофельного крахмала для температур 263, 253, 243 К. Как и в случае положительных температур они обнаруживают минимум. При отрицательных температурах минимум лежит в области адсорбционно связанной воды и выделяет две области изменения коэффициента  $\alpha$ : 1/ область монотонного убывания коэффициента  $\alpha$ ,  $W = 0-32,0\%$  и 2/ область резкого возрастания

коэффициента  $\alpha$ ,  $W = 32,0-70,0\%$ . В области  $0-32,0\%$  отличие от соответствующих зависимостей при положительных температурах имеет в основном количественный характер, лед-цемент в этой области влагосодержаний отсутствует. Убывание коэффициента  $\alpha$  в этой области объясняется относительным постоянством коэффициента  $\lambda$  и возрастающим характером изменения объемной теплоемкости  $C_v$ . В области влагосодержаний  $32,0-70,0\%$  коэффициент  $\lambda$  растет, объемная теплоемкость замедляет свой рост, в особенности при появлении льда. В связи с этим коэффициент  $\alpha$  приобретает все более возрастающие значения и достигает при  $W = 62,4\%$  значения  $0,180 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  для  $243 \text{ К}$ . Особенности теплофизических свойств картофельного крахмала четко выступают при сравнении их с теплофизическими свойствами кварцевого песка и глуховецкого каолина. Так, при  $T=243 \text{ К}$  и влагосодержании  $W = 62,4\%$  теплофизические характеристики картофельного крахмала находятся в следующем соотношении с теплофизическими характеристиками кварцевого песка и глуховецкого каолина:  $\lambda_{\text{кк}} < \lambda_{\text{рк}} \ll \lambda_{\text{кп}}; \alpha_{\text{кк}} < \alpha_{\text{рк}} < \alpha_{\text{кп}}; C_{\text{кк}} > C_{\text{рк}} > C_{\text{кп}}$ . Эти соотношения, в частности объясняются тем, что значительная часть воды в картофельном крахмале находится в связанном состоянии.

Одной из современных тенденций развития молекулярной теплофизики является разработка расчетных методов определения параметров теплопереноса, т.к. обилие материалов, трудоемкость и длительность теплофизического эксперимента не представляет возможности решения всей суммы теоретических и практических задач исключительно опытным путем. Для анализа проблем теплопереноса, расчета эффективных значений коэффициентов теплопроводности гетерогенных систем с учетом их реальной структуры в настоящее время широко применяется принцип обобщенной проводимости, который получил освещение в работах Г.Н.Дульнева, А.Ф.Чудновского, Ю.П.Заричняка, Л.Л.Васильева, М.Г.Кангачера, де Фрива и других авторов.

Для сопоставления опытных данных о теплофизических свойствах

твердых дисперсных систем с расчетными было проведено вычисление эффективной теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$  типичного капиллярнопористого тела - кварцевого песка. На основании критического анализа различных моделей и схем для расчета коэффициента  $\lambda_{\text{эф}}$  систем скелет-воздух, скелет-вода была выбрана модель структуры зернистых систем с учетом хаотического характера их структуры /по Ю.П.Заричняку/; для расчета эффективной теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$  системы скелет-лед, формула Г.И.Дульнева. Максимальное расхождение между расчетными данными и данными эксперимента не превышает 8%.

У.

В пятой главе /стр.141-152/ приводятся результаты экспериментальных исследований эволюции температурных полей промерзания в кварцевом водонасыщенном песке. Температурные поля промерзания исследовались на разработанной нами установке, состоящей из теплоизолированного цилиндра с засыпкой водонасыщенного кварцевого песка, заключенного между двумя термостатными коробками, поддерживаемых при температурах 290 и 253 К для задания температурного градиента. Послойное измерение температур производилось с помощью 10 медь-константановых термопар и фиксировалось на электронном потенциометре ЭП 09 ЗМ. Данные измерений позволили установить закономерности промерзания и кинетику формирования температурных полей промерзания. Данные измерений представлены в форме графиков и таблиц. По данным эксперимента была получена эмпирическая зависимость для закона движения нулевой изотермы:  $\xi = 1,197t^{0,634}$

Процессы промерзания водонасыщенного кварцевого песка были смоделированы на интеграторе СДМ-3 /Институт проблем литья АН УССР/. Для областей талого и мерзлого состояний наблюдается хорошее совпадение данных эксперимента и модельных расчетов.

Фазовые переходы на модели происходят несколько позже, чем в эксперименте. Последнее, очевидно, связано с тем, что при моделирова-



нии не учтен перенос влаги под действием так называемого "поршневого эффекта".

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Существенно модифицированы установки по определению теплофизических свойств, количества незамерзшей воды, температур кристаллизации поровых растворов, составляющие измерительный комплекс для исследования теплофизических и криогенных свойств твердых дисперсных систем в диапазоне температур 233-343 К и влагосодержаний от сухого до близкого к полному влагонасыщению состояний.

2. С помощью изотермического калориметра получены температурные зависимости количества незамерзшей воды в кварцевом песке, глуховецком каолине и картофельном крахмале для интервала температур 273-243 К. Эти данные находятся в прямой связи с гидрофильностью объектов исследования.

3. Экспериментально исследованы температурные зависимости истинных удельных теплоемкостей засыпок сухого кварцевого песка, глуховецкого каолина и картофельного крахмала в интервале температур 293-123К. Они имеют практически линейный характер.

4. Исследованы температуры переохлаждения  $T_n$  и начала замерзания  $T_{нз}$  поровой влаги в кварцевом песке, глуховецком каолине и картофельном крахмале при разных значениях влагосодержаний. У крахмала обнаружено при влагосодержаниях  $W \approx 52\%$  существование стекловидного состояния без фазовых переходов в лед поровой влаги.

5. На основании сопоставления полученных опытных данных для зависимостей  $\lambda=f(W)$ ,  $\alpha=f(W)$ ,  $C=f(W)$  при положительных и отрицательных температурах установлено, что эти зависимости имеют лишь для кварцевого песка качественно одинаковый характер. Для глуховецкого каолина и картофельного крахмала эти зависимости резко отличаются, что указывает на качественные и количественные отличия закономерностей внутреннего теплопереноса в зависимости от дисперс-

ности и гидрофильности этих тел.

6. Установлено, что максимум зависимости  $\alpha=f(W)$ , приходящийся для положительных температур на влагосодержание  $W = 6\%$  у кварцевого песка соответствует пленочно-менисковому состоянию влаги. При отрицательных температурах этот максимум перемещается в область влагосодержаний  $W = 13-15\%$  и теряет свой явно выраженный характер. В области отрицательных температур для кварцевого песка с однородной формой связи влаги зависимость  $\lambda=f(W)$  имеет монотонно возрастающий характер. Зависимость  $C=f(W)$  имеет практически линейный характер.

7. Для глуховецкого каолина установлено наличие максимума зависимости  $\alpha=f(W)$  при положительных температурах, совпадающее со значением максимального гигроскопического влагосодержания  $W_{гг} = 9,7\%$ . Для отрицательных температур максимум зависимости  $\alpha=f(W)$  отсутствует и на кривой  $\alpha=f(W)$  можно выделить 3 характерные области:  
1/ область незначительного увеличения коэффициента  $\alpha$ ,  $W = 0-5\%$ ;  
2/ область относительного постоянства коэффициента  $\alpha$ ,  $W = 5-20\%$ ;  
3/ область резкого увеличения коэффициента  $\alpha$ ,  $W = 20-48\%$ . Зависимость  $\lambda=f(W)$  для глуховецкого каолина имеет относительно монотонный характер, усиливающийся после влагосодержания  $W = 20\%$ . Зависимости  $C=f(W)$  имеют нелинейный характер. Особенности теплофизических свойств глуховецкого каолина связаны с характером локализации влаги, образованием льда-цемента и криогенной текстуры.

8. Для картофельного крахмала в интервале отрицательных температур установлены две характерные области зависимости  $\alpha=f(W)$ :  
1/ область монотонного убывания коэффициента  $\alpha$ ,  $W = 0-32\%$ ;  
2/ область резкого возрастания коэффициента  $\alpha$ ,  $W = 32-70\%$ . Минимум зависимости  $\alpha=f(W)$  примерно совпадает с величиной адсорбционно связанной воды в крахмале. Зависимости  $\lambda=f(W)$  монотонно возрастают до значений влагосодержаний  $W = 40\%$ , усиливаясь в интервале влагосодержаний 40-70%. Зависимости  $C=f(W)$  имеют нелиней-

ный характер.

9. На основе теории обобщенной проводимости рассчитана величина коэффициента эффективной теплопроводности  $\lambda_{эф}$  сухого и водонасыщенного влажного и мерзлого кварцевого песка. Для расчетов сухого и влажного кварцевого песка использовалась модель структуры зернистых систем с учетом хаотического характера их структуры /по Ю.П.Заричняку/. Система кварцевый песок-лед рассчитывалась по формуле Г.Н.Дульнева. Максимальное расхождение между расчетными данными и экспериментом не превышает 8%.

10. Разработана установка для изучения температурных полей промерзания твердых дисперсных систем и проведено экспериментальное исследование кинетики температурных полей промерзания типичного капиллярнопористого тела /кварцевого песка/ в водонасыщенном состоянии. Установлен эмпирический закон движения границы промерзания кварцевого песка:  $\xi = 1,197t^{0,634}$ . С помощью аналоговых методов проведено моделирование задачи промерзания водонасыщенного кварцевого песка. Расчетные данные относительно кинетики температурных полей промерзания обнаруживают удовлетворительное совпадение с данными эксперимента для зоны талого и мерзлого состояний.

Основные результаты работы доложены на Третьем Всесоюзном совещании по электрической обработке материалов /Кишинев, 1971/, на Четвертом Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену /Минск, 1972/, на Четвертой научно-практической конференции УкрНИИ мясомолпрома /Киев, 1972/, на отчетных конференциях кафедры физики Винницкого педагогического института им.Н.Острожского /1966-1973/ и опубликованы в следующих работах:

1. Душенко В.П., Андрианов В.М., Кучерук И.М. Автоматизация установки для определения коэффициента температуропроводности материалов при отрицательных температурах. В кн.: "Машины и приборы для испытания материалов", М., "Металлургия", 1971, стр.142-143.

2. Дущенко В.П., Андрианов В.М., Кучерук И.М., Плотницкий В.Ф. Параметры теплопереноса в некоторых влажных твердых дисперсных телах при отрицательной температуре. В сб.: Тепло-и массоперенос, т.7. Переносные свойства веществ. Минск, ИТМО, 1972, стр.239-243.
3. Дущенко В.П., Андрианов В.М., Кучерук И.М. Универсальная установка для определения теплофизических характеристик коллоидных и коллоидных капиллярнопористых материалов при отрицательных температурах. В сб.: Тезисы докладов совещания "Пути ускорения научно-технического прогресса в мясной и молочной промышленности Украины", Киев, УкрНИИмясопродукт, 1972, стр.45-46.
4. Дущенко В.П., Андрианов В.М., Кучерук И.М. Исследование теплофизических свойств крахмала в зависимости от влагосодержания при отрицательной температуре. В сб. там же, стр.117-118.
5. Дущенко В.П., Андрианов В.М. Некоторые результаты экспериментально-аналитического изучения температурных полей промерзания типично влажной твердой дисперсной системы. В сб.: Физика твердого тела, Киев, КГПИ, стр.130-135.
6. Дущенко В.П., Андрианов В.М. О теплофизических свойствах влажного картофельного крахмала при отрицательных температурах. В сб.: "Харчова промисловість", Киев, № 15, 1972, стр.56-59 /на укр. языке/.
7. Дущенко В.П., Андрианов В.М., Кучерук И.М., Грищенко Э.В., Костюк Н.С. Исследование истинных удельных теплоемкостей типичных твердых дисперсных материалов в области температур 123-293 К. В сб.: Теплофизика и теплотехника, вып.25, Киев, "Наукова думка", 1973.

---

БЮ-00082. Подписано в печать 6.04.73 г.

Тираж 200 . Зак. № 65.

---

Винницкий пединст., лаборатория фотофсетной печати