

ВАНЧИКОВ ВИКТОР ЦЫРЕНОВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ С ЦЕЛЮ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ И  
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность: 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Рыбинском государственном авиационном техническом университете имени П.А. Соловьева.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
Пиралишвили Шота Александрович

Официальные оппоненты: Цаплин Алексей Иванович,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой общей физики ФГБОУ  
ВПО  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет».

Дроздов Игорь Геннадьевич,  
доктор технических наук, профессор, директор  
института машиностроения и аэрокосмической  
техники ФГБОУ ВПО «Воронежский  
государственный технический университет».

Руденко Михаил Георгиевич,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры энергообеспечение и теплотехники  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный  
аграрный университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный  
технический университет».

Защита состоится 2015 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного  
совета Д 212.210.03 на базе ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный  
авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934,  
г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, ауд. Г – 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Рыбинский  
государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»  
и на сайте <http://www.rsatu.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Надежда Анатольевна Каляева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие методов интенсификации теплоотдачи с использованием микроканалов в энергетических установках резко подняло интерес к изучению гидродинамики и тепломассопереноса в капиллярных каналах. Это стало актуальным с перспективой применения капилляров в промышленности для интенсификации тепломассопереноса в испарителях-конденсаторах энергетических устройств, паровых котлах, тепловых насосах. С уменьшением диаметра капилляра определяющим фактором становится доминирующая роль поверхности раздела, в котором проявляются атомно-молекулярная дискретность строения вещества, волновая природа процессов переноса, квантовые размерные эффекты и т.д. Поэтому ключевые вопросы проектирования перспективных физико-энергетических установок с капиллярными интенсификаторами связаны с общими междисциплинарными проблемами не только в молекулярной технологии, но и в капиллярной пропитке, фильтрации жидкости, и другими поверхностными явлениями в различных технологических процессах.

Актуальность темы диссертации подтверждается ростом объема исследований в нашей стране и за рубежом, посвященных массопереносу при формировании многослойных тонких пленок жидкого материала на подложках. Отмеченные исследования стали одним из новых научно-технических направлений, конструкторско-технологические решения которых позволяют достигать принципиально нового уровня интенсификации энергетических процессов в тепловых трубах, повышения эффективности генераторов полезной энергии и создания новых конкурентноспособных технологий.

Исследования в области адгезионных процессов массообмена в пристенных слоях капельной жидкости до настоящего времени базируются главным образом на принципах равновесной феноменологической термодинамики. Несмотря на полученные практические результаты, многие особенности процессов адгезии

поверхности твердых тел и жидкостей не изучены, что объясняется сложностью явлений в межфазных границах.

**Степень разработанности темы исследования.** В последнее десятилетие появилась возможность реально идти по пути получения изделий методом поатомной (или помолекулярной) сборки и создавать промышленные технологии, которые неразрывно связаны с расширением научных исследований в области практического использования недостаточно изученных физических процессов, явлений. К ним относится и эффект адгезии частиц потока жидкости к стенкам капилляров (облитерация), физическими особенностями которого являются ненасыщенность связей на поверхности и проявления атомно-молекулярной дискретности строения вещества.

Практическому использованию отмеченного эффекта препятствует отсутствие разработанной теории конвективного механизма тепло-массообменных процессов в граничных слоях жидкости, происходящих под действием энергии потока. В отличие от диффузионного механизма (закон Фика), выравнивающего пространственную неоднородность плотности, конвективный механизм массопереноса в пристенных течениях управляется адгезионно-перколяционными явлениями. Опыт внедрения ультразвуковой пропитки обмоток якорей тяговых электродвигателей тепловозов позволил автору сформулировать проблемы, препятствующие изучению гидроадгезионных процессов между частицами потока и микрочастицами твердой поверхности, происходящих при малых числах Рейнольдса:

- отсутствуют физические модели, адекватно описывающие режимные характеристики течения, сопровождаемые процессом образования многослойной неподвижной пленки граничного слоя жидкости на внутренней поверхности стенки капилляров;

- не разработаны экспериментальные методы изучения массообменных процессов, происходящих в условиях прилипания молекул частиц потока жидкости к стенкам капилляров;

– отсутствует математическая модель процесса утолщения граничного слоя, выраженная в характерных переменных течения, как функция поперечной координаты движения жидкости по капиллярному каналу;

– отсутствуют модель расчета расхода жидкости в капиллярах, позволяющая рассчитать силу динамического давления потока на пленку жидкости, и расчетная формула оценки величины энергии связи молекулы в граничном слое с учетом адгезионно-перколяционных процессов и деформационного движения жидких частиц потока;

– не разработаны методы интенсификации переноса субстанций (энергии, импульса и массы) в пористо-капиллярных материалах массообменных колонок с учетом гидроадгезионных процессов.

Решение отмеченных проблем позволит повысить эффективность, надежность работы оборудования энергетики, совершенствовать капиллярные и тонкопленочные технологии на основе целенаправленного использования контролируемого изменения толщины граничного слоя жидкости.

Таким образом, развитие теории массообменных процессов в граничных слоях жидкости с целью совершенствования капиллярных и тонкопленочных технологий представляет актуальную проблему, имеющую важное хозяйственное значение.

**Цель работы.** Предложить и экспериментально обосновать уточненную теоретическую модель, описывающую причинно-следственную взаимосвязь облитерационных явлений при течении жидкости в капиллярно-щелевых каналах, оказывающих существенное влияние на интенсивность явлений переноса в физических и технологических процессах.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**.

◆ Провести теоретико-аналитическое исследование известных фактов адгезионно-перколяционных явлений в виде облитерации капилляров и фильтрационного эффекта в пористой среде, результаты которого применить для разработки методологии объяснения проблемы теплофизических особенностей

отмеченных явлений с отражением путей и способов их промышленного использования.

◆ Разработать методологические основы постановки экспериментальных исследований, использующие известные подходы к решению возникающих проблем, на основе которых осуществить уточнение экспериментальных и теоретических результатов изучения особенностей гидроадгезионных и теплогидравлических процессов, происходящих в капиллярно-щелевых каналах. Обосновать методологическую основу формирования теории конвективного механизма массообмена в граничных слоях жидкости.

◆ Разработать экспериментальное устройство, позволяющее производить количественную оценку величины силы межмолекулярного взаимодействия частиц потока жидкости и микрочастиц поверхности твердого тела.

◆ Экспериментально исследовать эффект адгезии частиц потока жидкости в зависимости от материала и геометрической формы поперечного сечения капиллярного канала, температуры и примесей.

◆ Разработать физико-математическую модель процесса утолщения пристенного слоя, происходящего в условиях прилипания частиц потока к твердой поверхности, и определяемого как функция поперечной координаты движения жидкости по капилляру.

◆ Провести теоретические исследования многообразия проявлений общего характера контактных сил, свойств вихревого движения и перколяционных явлений, используя при этом данные из теории строения идеального кристалла Я.И. Френкеля и теории перколяции.

◆ Теоретически обосновать взаимосвязь между гидродинамикой и теплообменом в капиллярных каналах в виде безразмерных комплексов, характеризующих эффект адгезии частиц потока к стенкам капилляров.

◆ Разработать методику лабораторных и эксплуатационных испытаний крупногабаритных натуральных объектов – якорей тяговых электродвигателей тепловозов.

**Научная новизна** полученных в диссертации результатов заключается в следующем.

– Предложена модель переноса массы вынужденной конвекцией в капиллярно-щелевых каналах, позволяющая производить количественные расчеты массообмена с учетом адгезионно-перколяционных процессов и деформационного движения жидких частиц потока.

– Разработано математическое описание процесса утолщения неподвижной пленки граничного слоя, использующее изменение соотношения характерных переменных как функцию поперечной координаты движения жидкости в капиллярно-щелевых каналах с учетом влияния сил взаимодействия молекул жидкости и поверхности твердого тела, получившее подтверждение в экспериментах.

– Разработан экспериментальный метод определения силы адгезии жидкости и твердого тела, на основе которого определена величина энергии связи молекулы жидкости в неподвижной пленке граничного слоя, подтверждающая обусловленность явления адгезии силами Ван-дер-Ваальса.

– Установлена разновидность ламинарного течения жидкости, сопровождаемая прилипанием молекул частиц потока к стенкам капилляров при числе Рейнольдса равным 6.3, и критическая доля объема порога протекания (перколяции) 0.16, отображающие дискретность микроструктуры конденсированных тел.

– Разработан метод упорядочения структуры тонкой пленки жидкости в капиллярных подложках.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** С использованием известных гидроадгезионных явлений облитерации капиллярных каналов, происходящих под действием Ван-дер-Ваальсовых сил межмолекулярного взаимодействия поверхностных слоев потока жидкости и твердого тела, получены теоретические основы процесса утолщения неподвижной пленки граничного слоя жидкости и предложено расчетное уравнение, выраженное в характерных

переменных течения как функция поперечной координаты движения, позволяющее его рассчитать и объяснить возможность управления массо-теплообменными процессами.

На основании разработанных теоретических основ представлена возможность прогноза ожидаемого повышения коэффициента теплоотдачи в капиллярных каналах за счет увеличения вклада теплопроводности воды, а также возрастание адгезии пропиточной жидкости под воздействием ультразвуковых колебаний обусловленных интенсификацией массообменных процессов в граничных слоях.

**Реализация результатов работы в промышленности.** Ультразвуковой метод пропитки обмоток якорей тяговых электродвигателей тепловозов используется на Челябинском электровозоремонтном заводе, Уссурийском локомотиворемонтном заводе, локомотивном депо Инская и локомотивном депо Карасук (Новосибирская область). Результаты диссертационной работы составляют основу разработок, исследований и промышленного освоения ультразвукового способа пропитки обмоток электрических машин на железнодорожном транспорте.

**Методология и методы исследования.** На основе постулатов молекулярно-кинетической теории, теплофизических основ термодинамики и динамики конденсированного состояния несжимаемых сред разработана методология обоснования теплофизических процессов, наблюдаемых в опытах и технических объектах, процессов облитерации, происходящих за счет притяжения жидких частиц (элементарных объемов несжимаемой среды) в граничных слоях текущей в микроканалах жидкости. Достижения полученных результатов обеспечены данными физического эксперимента на модифицированном капиллярно-сталагмометрическом устройстве с использованием известных методов математической обработки, а также на базе разработанных в диссертации теоретических положений и основополагающих закономерностях термогидродинамики, тепломассообмена в микроканалах.



**Положения, выносимые на защиту:**

◆ Математическое описание микроскопического изменения просвета капилляров при адгезии частиц потока жидкости к поверхности твердых тел и подтверждающие его результаты экспериментов, полученных на модифицированном сталагмометре.

◆ Теоретическое и опытное обоснование процессов массопереноса в капиллярных системах в условиях прилипания частиц потока жидкости к твердой поверхности, наблюдаемое при числе Рейнольдса, равным 6,3.

◆ Результаты экспериментов, проведенных в условиях воздействия электротока, ультразвука, инфракрасного излучения на неподвижную пристенную пленку жидкости, подтверждающие интенсификацию массообменных процессов в граничных слоях жидкости.

◆ Способ управления теплофизическими параметрами лаковой пленки при воздействии ультразвуковых колебаний, характеризуемый существенным увеличением электрической прочности изоляции обмоток электромашин.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена корректным применением фундаментальных законов и уравнений теплофизики, термодинамики и гидромеханики, постановкой экспериментальных исследований с применением метрологически поверенного оборудования, обработкой опытных данных с использованием статистических методов; подтверждается адекватным согласованием расчетов с опытными данными и результатами исследований других авторов.

**Основные положения диссертационной работы** докладывались и обсуждались на семинарах кафедры физики ВСТИ (Улан-Удэ, 1987-88), института теплофизики СО АН СССР (Новосибирск, 1988), кафедры теоретической механики ИрИИТ (Иркутск, 2000), кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского электротехнического университета, лаборатории молекулярной физики отдела физических проблем Бурятского научного центра СО РАН (Улан-Удэ, 2000) и на Российской

конференции «Фундаментальные и прикладные исследования – транспорту» (Екатеринбург, 2000) и получили положительную оценку на международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Энергосберегающие технологии и окружающая среда» (Иркутск - Афины, 2004); «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт» (Тобольск, 2004); «Информационные и математические технологии» (Иркутск, 2004); «Экономические, медицинские и социальные проблемы» (Пенза, 2007); «Вода и жизнь» (Иркутск, 2010), на конференциях и научных семинарах ИрГУПС (Иркутск, 2003-2014 гг.), а также на научном семинаре РГАТУ (г. Рыбинск, 2014 г.).

**Публикации по теме диссертации.** По материалам диссертации опубликованы 22 печатные работы, в том числе одна монография, 13 статей в журналах, рекомендованных ВАК, одно авторское свидетельство, четыре патента на изобретение и один патент на полезную модель. Без соавторов опубликованы 3 работы. В работе с соавторами автору принадлежит определяющий вклад.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 210 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 4 таблицы и одно приложение. Библиография включает 183 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, поставлены цель и задачи исследований, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов.

**В первой главе** выполнен аналитический обзор отечественных и зарубежных публикаций, посвященных экспериментальному исследованию ньютоновского течения, сопровождаемое процессом прилипания частиц потока жидкости к стенкам капилляров. Различные аспекты, связанные с изучением особенностей течения вязких жидкостей в капиллярных каналах, пористых средах и тепловых трубах с закрученным потоком освещены в основополагающих

работах А. Адамсона, А.С. Ахматова, Т.М. Башта, С.В. Белова, академика Б.В. Дерягина, И.Г. Дроздова, А.Д. Зимона, академика Я.Б. Зельдовича, Р. Коллинза, Ш.А. Пиралишвили, В.М. Поляева, П.А. Ребиндера, М. Рейнера, М.Г. Руденко, Д. Хаппеля, А.И. Цаплина, Б.И. Шкловского, А.Л. Эфроса и других зарубежных и отечественных авторов.

Как показывают опыты с уменьшением поперечного размера капиллярно-целевого канала теплоотдача воды резко возрастает, что важно при решении проблемы охлаждения энергонапряженных конструкций. В качестве примера, подтверждающего сложность отмеченной проблемы, можно привести отсутствие строгой теории движения жидкости по капиллярам. Развитие этой теории в значительной степени сдерживается тем, что до сих пор неизвестны причины взаимодействия и объединения жидких частиц (кластеров) друг с другом, из-за чего, например, возникает эффект адгезии частиц потока жидкости к стенкам капилляров. Процесс адгезии сопровождается формированием многослойных пленок (граничных слоев) жидкости на внутренних стенках капилляров. Исследователям еще почти неизвестны фундаментальные закономерности поведения молекул жидкости, объединяющие их в кластеры. Такие объединения по своей природе являются флуктуационными. Еще предстоит понять физическую сущность и фундаментальные пределы этих флуктуаций. Жидкая частица потока в капиллярах одновременно слишком мала (для непосредственного наблюдения и изучения) и слишком велика (например, для квантовомеханических расчетов «из первых принципов», которые в этом масштабе оказываются слишком приближенными). К ним уже неприменимы подходы, развиваемые в континуальных приближениях. Вместе с тем малые размеры между ними и межмолекулярное взаимодействие кластеров лишают возможности рассмотрения ситуации через хорошо известные свойства изолированных атомов.

Модель вязкого подслоя из теории пограничного слоя для объяснения процессов адгезии частиц потока к стенкам капилляров не приемлема из-за того,

что она справедлива только при больших числах Рейнольдса, когда инерционные (динамические) силы велики по отношению к силам вязкости. Прилипание частиц потока к поверхности граничного слоя жидкости в капиллярах характеризует ситуацию, когда силы вязкости доминируют над динамическими силами. В пределах толщины пограничного слоя течение жидкости не останавливается. В противоположность этому понятие граничного слоя означает неподвижное состояние многослойной тонкой пленки жидкости, вызванное силой адгезии стенки капилляров. Определение краевых условий формирования многослойных тонких пленок жидкости в капиллярных подложках гидродинамическим потоком существенно отличается от пограничного слоя по условиям однозначности:

- неподвижность пленки жидкости;
- физическое условие, характеризуемое значительным увеличением вязкости жидкости в граничном слое;
- граничное условие, характеризуемое нестационарностью условия прилипания  $v = 0$ ;
- течения жидкости при малых числах Рейнольдса характеризуются малой величиной динамических сил.

В диссертационном исследовании поставлена теплофизическая проблема определения взаимосвязи функции формпараметра с законом закрытия просвета капилляров в случае эффекта адгезии частиц потока к стенкам капилляров. Функции формпараметра должны характеризовать свойство самой контактной системы поток жидкости – твердое тело и влиять на развитие процесса утолщения граничного слоя. При исследовании процесса прилипания молекул жидких частиц потока к стенкам капилляров необходимо установить дополнительные условия, однозначно формирующие физико-математическую проблему, с учетом внутренних (собственных) характеристик в масштабе межмолекулярного взаимодействия.

Обзор экспериментальных исследований явления облитерации капилляров, фильтрационного эффекта в пористой среде позволил выделить

наиболее характерные и принципиально важные свойства граничных слоев жидкости: проявлять сдвиговую упругость формы, вызванную силами адгезии жидкости и твердого тела; увеличивать толщину слоя прилипания до 100 мкм. Анализ отмеченных исследований обуславливает необходимость перехода от качественных оценок к количественным характеристикам в виде законченной рациональной теории массообменных процессов в граничных слоях жидкости, имеющую в своей основе определенную физическую модель адгезии молекул жидких частиц потока к стенкам капилляров.

Уточнение максимальных пределов увеличения толщины граничного слоя в капиллярах требует разработки методики, позволяющей определять микроскопическое изменение толщины неподвижной пленки граничного слоя. При этом отмеченная граница нулевой скорости  $v = 0$  перемещается во внутрь потока жидкости и отдалается от твердых поверхностей на толщину неподвижной пленки граничного слоя, что исключает изучение свойств граничного слоя традиционными методами гидромеханики. Эти трудности преодолены внесением дополнительных условий, учитывающих гидроадгезионные и перколяционные процессы.

**Вторая глава.** Теплогидравлические процессы в капиллярно-щелевых каналах и капиллярно-пористых телах тепловых труб связаны с проявлением скачкообразного увеличения потерь напора жидкости по длине канала. В этих условиях интенсификации переноса жидкости в криогенных, низкотемпературных тепловых трубах необходимо установить конкретный вид кинетики адгезионно-перколяционных процессов на поверхности раздела между потоком жидкости и неподвижной пленки граничного слоя. В этой связи экспериментально определены условия возникновения эффекта адгезии молекул жидких частиц потока к стенкам капилляров, сопровождаемые увеличением толщины граничного слоя. Причем размер нарастания неподвижной пленки граничного слоя имеет микроскопическую величину, что приводит к

микроскопическому уменьшению просвета капилляров, следовательно, расход жидкости также уменьшается на микроскопическую величину.

Отмеченное малое изменение расхода, измеряемое в микролитрах за секунду, требует необходимого уменьшения поперечного сечения каналов и объема мерного сосуда. Для определения величины силы адгезии частиц потока жидкости с микрочастицами поверхности твердого тела применен горизонтально расположенный капилляр, исключаящий из рассмотрения силы тяжести и конвективные составляющие ускорения силы инерции. В качестве мерного сосуда берется вместимость одной капли. Принцип постоянства капли, применяемый для измерения поверхностного натяжения методом счета капель, использован для проведения гидроадгезионных опытов по изучению вынужденного конвективного механизма массопереноса в граничных слоях жидкости.

Проблема неразличимости частиц потока и частиц неподвижной пленки граничного слоя жидкости, а также микроскопическая толщина этой пленки не позволяет определять прямым методом абсолютное значение поперечного размера пристенного слоя. Эту трудность можно обойти относительным (симплексным) методом, основанным на формуле Гагена-Пуазейля для течения жидкости по капилляру. Относительный метод позволяет перейти к безразмерным симплексным комбинациям, что имеет чрезвычайно важное методологическое значение для автотомельных решений. Переход к безразмерным характеристикам существенно сокращает число переменных физико-математической модели адгезии потока жидкости с поверхностью твердого тела. Решение проблемы приобретает универсальный характер, не связанный с конкретными значениями размерных величин.

Отмеченный метод позволил определить взаимосвязь времени наполнения мерных сосудов с уменьшением радиуса капилляра в условиях явления утолщения неподвижной пленки граничного слоя жидкости:

$$t_n / t_L = (r_L / r_n)^2, \quad (1)$$

где  $t_n$  и  $r_n$  – время наполнения мерного сосуда и радиус капилляра в начале эксперимента,  $t_L$  и  $r_L$  – время наполнения мерного сосуда и радиус капилляра в процессе эксперимента. В соотношении (1) симплексные характеристики состоят из характерных переменных существенных для описания процесса закрытия просвета капилляров, происходящих в условиях прилипания частиц потока к неподвижной пленке граничного слоя.

Обозначая  $r_n^2$  в (1) через  $S_n$ , а  $r_L^2$  через  $S_L$ , получим:

$$t_n/t_L = S_L/S_n = S_{nL} \quad (2)$$

где  $S$  представляет собой симплексную характеристику, нижние индексы  $n$  и  $L$  соответственно обозначают начальное и текущее состояние характерных переменных течения, определяемых как функция поперечной координаты движения жидкости по капилляру. Отсюда следует, что

$$t_n S_n = t_L S_L = K,$$

где  $K$  – постоянная величина, обусловленная принципом постоянства объема капли при фиксированных условиях. Из последнего соотношения вытекает, что *произведение времени наполнения мерного сосуда постоянной и малой вместимости жидкостью на площадь поперечного сечения капилляра величина постоянная.*

На рисунке 1 приведены типичные графики уменьшения просвета трубок в случае прилипания частиц потока к стенкам капилляров. Для косвенного измерения величины утолщения неподвижной пленки граничного слоя симплексные характеристики (1) и (2) приведены к виду:

$$S_{nL}(t) = 1 - \xi t, \quad (3)$$

где  $\xi = [(2\Delta r)/r_n]$  – отношение увеличения толщины неподвижной пленки граничного слоя жидкости  $\Delta r$  к радиусу капилляра  $r_n$ , происходящего в течение одного часа;  $t$  – время полного закрытия просвета трубки в часах (см. рисунок 1). То есть, предложена методология определения параметра, характеризующего увеличение толщины тонкой пленки, основанная на принципах относительного метода.

Из выражения (3) можно получить безразмерную величину, характеризующую процесс утолщения неподвижной пленки граничного слоя в течение одного часа:

$$\xi = (1 - S_{nL}) / t.$$

Вычисленные значения  $\xi$  даны в таблице 1.

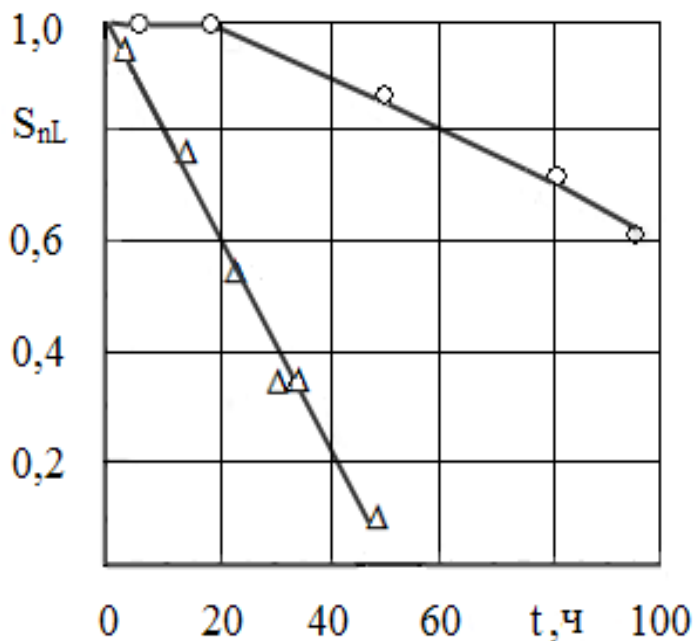


Рисунок 1 – Уменьшение просвета капилляров с течением времени:

○ – бидистиллированная вода, капилляр из боросиликатного стекла диаметром 124 мкм, длиной 5,2 см, перепад давления 200 Па; Δ – бидистиллированная вода, капилляр из нержавеющей стали диаметром 238 мкм, длиной 2,5 см, перепад давления 200 Па

Они показывают, что межмолекулярное взаимодействие между поверхностными слоями потока жидкости и стенками капилляров зависит от материала стенок и незначительно – от чистоты очистки жидкости.

Таким образом, появляется возможность изменять структуру многослойных тонких пленок подбором материала капиллярной подложки, что важно при организации массового производства устойчивых к сдвиговым деформациям тонкопленочных покрытий.



Таблица 1 – Измерение увеличения толщины граничного слоя жидкости

Увеличение относительной толщины граничного слоя $\xi$ в течение часа					
Боросиликатное стекло		Молибденовое стекло		Нержавеющая сталь	
дистиллят	бидистиллят	дистиллят	бидистиллят	дистиллят	бидистиллят
0,003	0,0037	0,0127	0,0104		0,0183
0,0028	0,0039	0,0132	0,0100		0,0183
0,0029	0,0035	0,0132	0,0100		0,0200
0,0026			0,0098		0,0186
0,0026	0,0039	0,013	0,0110	0,0217	0,0205
0,0030	0,0048		0,0109	0,0204	0,0203
0,0034	0,0050		0,0116	0,0210	0,0202
			0,0100	0,0214	
			0,0106		
			0,0144		

**Третья глава.** Разработка методов интенсификации переноса массы, импульса и энергии в низкотемпературных солнечных нагревателях, тепловых трубах с капиллярными фитилями, оканчивающихся парогенераторами или термоэлектрогенераторами, связана с установлением особенностей макроскопических и микроскопических аспектов гидроадгезионных процессов взаимодействия жидких частиц потока с твердой поверхностью. В этой связи показано, что в уравнении (3) величина  $\xi \cdot t$  за время  $t \leq 1,0$  часа становится микроскопической. Линейный закон процесса закрытия просвета трубки (в случае прилипания частиц потока к стенке капилляра) принимает вид:

$$S_{nL} = e^{-(\xi \cdot t)}. \quad (4)$$

С учетом выражений (1) и (2) уравнение (4) можно представить иначе:

$$S_L = S_n \cdot e^{-(\xi \cdot t)}$$

т.е. при длительности наблюдения менее одного часа процесс адгезии частиц потока жидкости к стенке капилляра (микроскопическое уменьшение просвета капилляра) подчиняется экспоненциальному закону изменения поперечного

сечения капилляра. Эта закономерность, управляющая явлением перехода макропроцессов в микроскопические, подтверждается другими физическими процессами.

Относительный метод позволяет определить *число Рейнольдса, приблизительно равное 6.3, при котором движение жидкости переходит в разновидность слоистого течения, характеризуемого процессом прилипания частиц потока к стенкам капилляров.* Обратная величина указанного числа, примерно равная 0.16, связана с переходными процессами в теории перколяции, сдвиговой деформации идеального кристалла Я.И. Френкеля и жидкостного трения. Теоретический результат Я.И. Френкеля о модуляции сдвигового усилия в процессе деформации идеального кристалла с периодичностью кристаллической решетки, равной 0.16, получил экспериментальное подтверждение при исследовании сил межмолекулярного взаимодействия на атомарной шкале посредством атомно-силового микроскопа.

Таким образом, обратная величина числа Рейнольдса, примерно равная 0.16, связана с макроскопическим проявлением микроструктуры конденсированных тел при действиях контактных сил.

При отмеченном числе Рейнольдса можем получить частный вид системы уравнений Навье-Стокса, позволяющих учесть микроскопические процессы адгезии частиц потока к стенкам капилляров  $K_L$  и макроскопические параметры течения  $K_n$ :

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0; \quad -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + K_{nL} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right),$$

где  $p$  – гидродинамическое давление;  $\rho$  – плотность жидкости;  $v$  – средняя скорость потока;  $K_{nL}$  – параметр, учитывающий адгезионно-перколяционное явление в процессе утолщения неподвижной пленки граничного слоя;  $x, y, z$  – координаты.

Дополнительные условия, связанные с учетом особенностей проявления перколяционных процессов адгезии частиц потока жидкости к стенкам

капилляров, привели к необходимости модификации формулы Гагена-Пуазейля в виде:

$$\frac{V_k}{t} = \pi^3 \left\{ \left[ \frac{1}{2\pi} \frac{r^2}{\eta} \right] \left[ \left( \frac{1}{2\pi} \pi r^2 \right) \left( \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta p}{L} \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $V_k$  – объем постоянной и малой вместимости;  $t$  – время наполнения мерного сосуда;  $\pi r^2$  – площадь поперечного сечения капиллярной трубки;  $(r^2/\eta)$  – параметр, учитывающий действие силы адгезии частиц потока жидкости и поверхности твердого тела при малых числах Рейнольдса;  $\eta$  – динамическая вязкость;  $\Delta p$  – перепад давления;  $L$  – длина трубки;  $1/2\pi \approx 0,16$ .

Обозначая в (5)  $C_\xi = 1/2\pi$ , запишем уравнения расхода в капиллярах с учетом гипотезы из теории протекания об универсальности доли объема, при которой возникает перколяционный процесс

$$Q = C_\xi^3 \cdot (\pi r)^4 \cdot \nabla^2 v, \quad (6)$$

где  $\nabla^2 v = -(\Delta p / \eta L)$ .

Таким образом, уравнение (6) выражает представление о механизме вязкостных, адгезионно-перколяционных процессов, сопровождающих процессы переноса энергии, импульса и массы гидродинамическим потоком в капиллярах. Оно составлено на основе анализа адгезионных процессов в течениях, происходящих при малых числах Рейнольдса, как некоторого частного случая применения фундаментальных принципов физики.

Естественно, связь столь общей природы не позволяет достигнуть той степени определенности, которая отвечает эффекту адгезии молекул жидких частиц потока к стенкам капилляров. При рассмотрении проблемы массообменных процессов в граничных слоях в полном объеме потребуется определение величины силы адгезии между потоком жидкости и твердой поверхностью. Для выделения в явном виде величины силы в уравнениях расхода жидкости в капиллярах проведены следующие преобразования.

Приравнявая (6) с объемным расходом  $Q = v \cdot S$ , умножая обе части равенства на плотность  $\rho$ , получим

$$\rho \cdot v \cdot S = \rho \cdot C_{\xi}^3 \cdot (\pi \cdot S)^2 \cdot \nabla^2 v. \quad (7)$$

Согласно второму закону Ньютона импульс силы произведения элементарного объема  $V$  жидкости на скорость  $v$  равен

$$F \cdot t = \rho \cdot v \cdot V,$$

полагая, что  $V = S L$ , выражение (7) можно представить в виде

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{F \cdot t}{L} = \left[ (C_{\xi} \cdot S) \cdot \left( \frac{1}{4} \cdot \nabla^2 v \right) \right] \cdot S = Q, \quad (8)$$

с помощью которого производится расчет величины силы динамического давления потока на стенки капилляров. После подстановки опытных данных в уравнение (8) определено приближенное значение динамической силы  $F \approx 3,2 \cdot 10^{-8}$  Н.

Таким образом, определен средний по сечению капилляра порядок величины силового воздействия потока жидкости на неподвижную пленку граничного слоя при особой разновидности ламинарного течения.

Если (8) представить в виде

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{F \cdot t}{S} = \left[ (C_{\xi} \cdot S) \cdot \left( \frac{1}{4} \cdot \nabla^2 v \right) \right] \cdot L = v, \quad (9)$$

то найдем расчетную формулу кинематического коэффициента вязкости  $\nu$ , с помощью которой определяется количественное значение силы адгезии жидкости и твердого тела («возвращающей» силы в потенциальной яме неподвижной пленки граничного слоя жидкости в капиллярах). Подставляя опытные данные в (9), получим значение  $F \approx 3,14 \cdot 10^{-11}$  Н. Этот результат отражает оценку порядка величины сдвиговой силы, возникающей в неподвижной пленке граничного слоя жидкости измерительной трубки модифицированного сталагмометра.

Подход, основанный на представлениях теории перколяции, позволяет произведение  $C_{\xi} \cdot S$  в (8) и (9) рассматривать как результат перколяционного

процесса, где множитель  $C_{\xi}$ , отражающий критическую долю микроскопического пространства, соизмеримую с дискретной микроструктурой конденсированных тел, умножается на площадь  $S$  раздела соприкасающихся слоев. Согласно теореме Коши-Гельмгольца множитель  $(1/4) \cdot \nabla^2 v$  в (8) и (9) определяет деформацию частиц потока жидкости. Таким образом, в уравнениях (8) и (9) содержится информация о слипании частиц между собой при одновременном разрушении когезионных связей у других. В данном случае теоретически обосновывается вывод о существовании изменяющихся скоплений молекул (кластеров).

Если уравнение (8) преобразовать к виду:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{F \cdot t}{V} = \left[ (C_{\xi} \cdot S) \cdot \left( \frac{1}{4} \cdot \nabla^2 v \right) \right] = v, \quad (10)$$

то получим расчетную формулу определения силы, которая требуется для отрыва жидкой частицы от «поверхности» неподвижной пленки граничного слоя.

Выражение (10) можно представить в форме уравнения И.В. Мещерского, отображающего движение тела с переменной массой:

$$F = \frac{m}{t} \cdot v. \quad (11)$$

В радиусе действия сил притяжения микрочастиц стенок капилляров жидкая частица ламинарного потока, состоящая из множества молекул, уменьшается, прилипая молекула за молекулой к «поверхности» неподвижной пленки граничного слоя в процессе укладки молекул потока в виде мультимолекулярных слоев на стенках капилляров.

В работе показано, что среднее значение возвращающей силы равно

$$F = - \Delta U / d, \quad (12)$$

где  $\Delta U$  – энергия связи молекулы жидкости в неподвижной пленке граничного слоя,  $d$  – диаметр молекулы. Подставляя в уравнение (11) значение возвращающей силы, полученного с помощью расчетной формулы (9),

можно найти величину энергии связи молекулы воды на «жидкой поверхности» неподвижной пленки граничного слоя (рисунок 2):

$$\Delta U \approx 5,9 \text{ кДж/моль (0,059 эВ/молек)}.$$

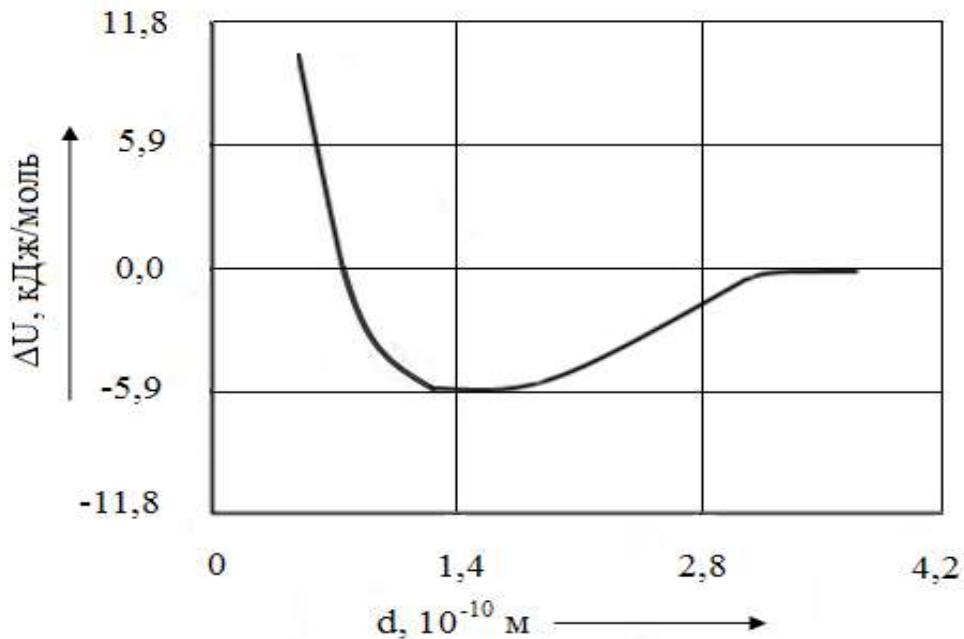


Рисунок 2 – Энергия связи молекулы воды в неподвижной пленке граничного слоя

Найденное значение, основанное на экспериментальных данных, меньше энергии фазового перехода льда в жидкость на 0,003 эВ/молек, но больше величины разрушающей тепловой энергии движения молекул на 0,02 эВ/молек.

**В четвертой главе** приведен вывод дифференциального уравнения переноса тепловой энергии теплопроводностью и движущейся жидкостью, когда происходит некоторый массообмен в заторможенном (за счет эффекта адгезии частиц) слое, примыкающим к стенкам капилляров:

$$\rho c_p \left( U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $c_p$  – теплоемкость жидкости при постоянном давлении,  $U$  и  $V$  – компоненты скорости потока жидкости,  $T$  – температура,  $\lambda$  – теплопроводность жидкости.

При комнатной температуре число Рейнольдса, когда возникает эффект адгезии частиц потока жидкости к стенкам капилляров, равно примерно 6,3. Тогда

число Пекле, характеризующее соотношение конвективного переноса тепловой энергии и переноса ее теплопроводностью, равно произведению

$$Pe = Re \cdot Pr = 6,3 \cdot 7,03 \approx 44,3.$$

Число Пекле представляет собой некоторый тепловой аналог числа Рейнольдса, характеризующий соотношение переноса тепловой энергии гидродинамическим потоком и переноса тепловой энергии теплопроводностью, т.е.

$$Pe = \rho c_p U_0 l_0 / \lambda = U_0 l_0 / a,$$

где  $a = \lambda / \rho c_p$ . Здесь за масштабы скорости  $U$  и координаты  $x$  приняты  $U_0$  и  $l_0$ , учитывающие масштабы адгезионных сил в капиллярах.

Если преобразовать выражение числа Пекле, разделив левые и правые части равенства на коэффициент кинематической вязкости воды  $\nu$ , то получим:

$$Pe \cdot a / \nu = U_0 l_0 / \nu = Re,$$

где  $Pe = Re \cdot Pr$ ;  $a / \nu = 1 / Pr$ .

Учитывая отмеченное значение  $Pe \approx 44,3$ , а также  $a \cdot 10^7 = 1,43 \text{ м}^2/\text{с}$  и  $\nu \cdot 10^6 = 1,006 \text{ м}^2/\text{с}$ , оценим количественное значение критерия Рейнольдса

$$Re = Pe \cdot a / \nu \approx 6,3.$$

В соответствии с уравнением (11) получено выражение преобразования кинетической энергии потока при выполнении работы  $A$  образования многослойной неподвижной пленки граничного слоя в виде:

$$A = (1/3) (m u / m_0) (\mu S) Re, \quad (13)$$

где  $u$  – скорость движения жидкости,  $m$  – масса жидкой частицы. Выражение (13) может быть истолковано как специфическая для вязкой ( $\mu$ ) жидкости форма работы при малых числах  $Re$ , совершаемой силой давления потока ( $F dt = d(m u)$ ) при перемещении молекулы  $m_0$  в направлении течения на поверхности  $S$  граничного слоя. В условиях прилипания частиц потока жидкости к стенкам капилляров кинетическая энергия гидродинамического потока преобразуется в работу упорядочения микроструктуры граничного слоя жидкости и уменьшает ее энтропию. Причем устойчивость жидкой пленки сдвигающим усилиям

определяется соотношением между тепловым давлением и силами сцепления молекул граничного слоя.

**В пятой главе** показано, как на основе экспериментальных и теоретических результатов исследования массообменных процессов в граничных слоях жидкости предложены различные методы интенсификации массопереноса в капиллярных фитилях тепловых труб, при пропитке обмоток электрических машин и в тонкопленочных технологиях.

В процессе циркуляции теплоносителя в капиллярных фитилях низкотемпературных тепловых труб, движения жидкости в дросселях корректирующих и управляющих устройств гидравлических систем автоматики с течением времени происходит явление адгезии твердыми стенками поляризованных молекул и коллоидных образований рабочей жидкости, которые перекрывают канал. Результаты диссертационного исследования показывают, что при диаметрах  $d < 0,2$  мм приходится считаться с явлением облитерации капилляров. В инженерной практике применение расчетной формулы  $Re > 2\pi = 1/C_\xi$  позволяет получить приемлемые результаты при выполнении проектировочных расчетов и реализовать метод предотвращения облитерации золотниковых преобразователей, капиллярных насадок в технологии капельного дозирования рабочей жидкости и гидравлических дросселях вычислительных устройств. Безотрывное течение в диффузорах, конфузорах с учетом особой разновидности ламинарного течения жидкости находится в пределах  $6,3 < Re < 54$ .

Адгезионно-перколяционные особенности проявления массообменных процессов в граничных слоях жидкости приводит к необходимости модернизации гидравлических вычислительных устройств введением стабилизирующего интервала  $L_{cm}$  в гидравлических линиях после каждого элемента отмеченного устройства:

$$L_{cm} = L_{нач} = (1/2\pi) \cdot d \cdot Re = C_\xi \cdot d \cdot Re,$$



где  $L_{\text{нач}}$  – начальный (входной) участок стабилизации ламинарного течения,  $d$  – диаметр трубки гидравлической линии (рисунок 3).

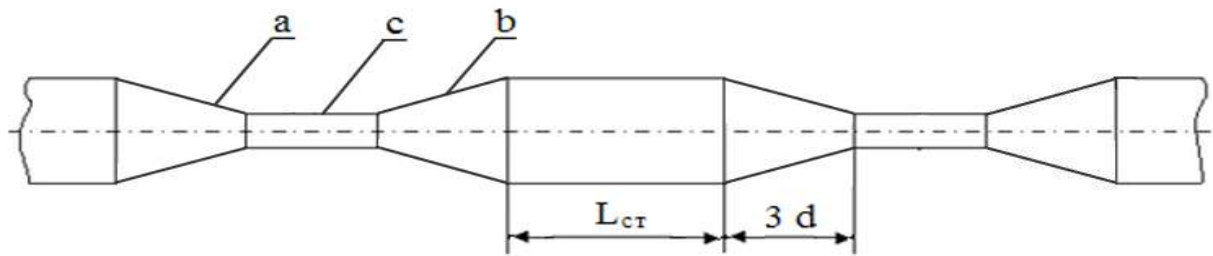


Рисунок 3 – Последовательная цепь гидросоединений: а – диффузор; б – конфузор;  
с – гидросопротивление (дроссель);  $L_{\text{ст}}$  – стабилизационный интервал

**В шестой главе** приводятся результаты экспериментов на физических моделях и натуральных объектах, определяющих эффективность методов интенсификации массообменных процессов в граничных слоях жидкости.

Энергетические процессы пропитки капиллярно-пористых материалов обмоток тяговых электродвигателей тепловозов связаны с решением задач интенсификации переноса массы изолирующего вещества посредством увеличения давления. Экспериментами установлено, что с увеличением давления ускоряется процесс облитерации микроканалов, препятствуя тем самым глубокому проникновению пропиточной жидкости в последующие друг за другом цепочки микропространств, образованных разветвленной системой поровых каналов и щелевых капилляров изоляционного материала. Остаются незаполненными жидкостью множества островков из отмеченных микропространств. Таким образом, во многих случаях применение избыточного давления при пропитке капиллярно-пористых тел не дает должного эффекта.

В работе предложено использовать ультразвуковой метод интенсификации переноса массы жидкости в технологии капиллярной пропитки обмоток электрических машин.

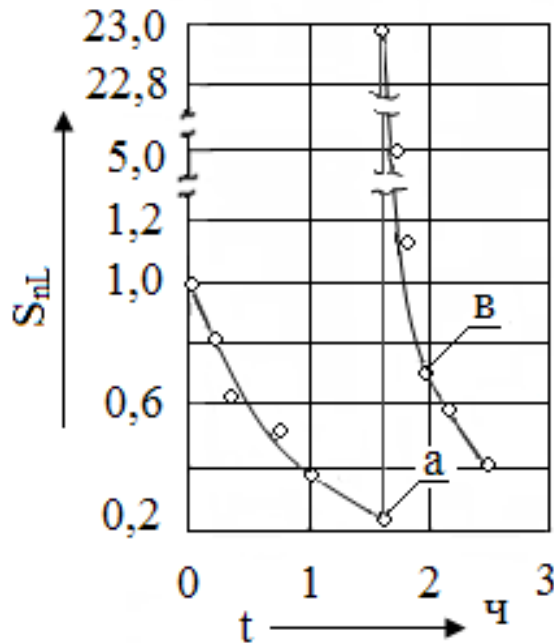


Рисунок 4 – Изменение относительного расхода «пропиточной» жидкости под действием ультразвуковых колебаний:

а – включение; в – отключение излучателя ультразвуковых колебаний

На рисунке 4 приведен график временной зависимости относительного расхода жидкости  $S_{nL}(t)$  при действии ультразвуковых колебаний (мощность 50 Вт, частота 22 кГц). Воздействие ультразвуковых колебаний увеличивает исходное количество расхода жидкости в 23 раза. Натурные эксперименты подтвердили отмеченную эффективность ультразвукового метода.

Применение ультразвукового метода интенсификации массопереноса в технологии пропитки при капитальном и деповском ремонте существенно улучшает теплофизические, механические и диэлектрические свойства лаковой пленки изоляции обмоток якорей тяговых электродвигателей тепловозов.

### Основные результаты и выводы

В работе изложены научные основы методов интенсификации процессов конвективного массообмена в граничных слоях жидкости и переноса тепла в капиллярно-щелевых интенсификаторах охлаждения энергонапряженных конструкций, включающие теоретические и экспериментальные исследования,

устанавливающие связи между дискретностью конденсированных тел при действии гидравлических сил сопротивления.

Данные положения подтверждаются следующими выводами и результатами:

1. Установлены экспериментально новые факты процессов переноса энергии, импульса и массы в граничных слоях жидкости:

– показано, что произведение времени наполнения жидкостью фиксированного объема малой емкости на площадь поперечного сечения капилляра величина постоянная;

– выявлено наличие перехода движения жидкости при числе Рейнольдса, приблизительно равном 6,3, в разновидность слоистого течения, характеризуемого прилипанием частиц потока к стенкам капилляров.

2. Разработана оригинальная методика расчета, основанная на результатах экспериментов, позволяющая определять количественные значения:

– силы динамического давления потока жидкости на стенки капилляров;

– силы межмолекулярного взаимодействия частиц потока жидкости и микрочастиц поверхности твердых тел;

– энергии связи молекулы жидкости в неподвижной пленке граничного слоя.

3. Установлено, что при действии контактных сил дискретность микроструктуры конденсированных тел проявляется как постоянная величина, приблизительно равная 6,3. Обратная величина  $(1/6,3)$  подтверждается в экспериментальных и теоретических результатах, приведенных в теории перколяции, теории дискретного строения идеального кристалла Я.И. Френкеля, гидромеханики, а также экспериментально на атомной шкале, где период осцилляции усилия зонда (кантилевера) атомно-силового микроскопа совпадает с периодом кристаллической решетки твердого тела.

4. Разработан метод ультразвуковой интенсификации массообменных процессов в граничных слоях жидкости.

5. Предложены методы, повышающие эффективность, надежность работы оборудования энергетики, и позволяющие:

– использовать гидроадгезионный режим течения рабочей жидкости, исключая появление облитерации в золотниковых преобразователях, ламинарных дросселях в гидравлических системах управления энергетического оборудования;

– применять капиллярные насадки для капельного дозирования жидкости в энергоустановках.

6. Опытно-промышленная апробация установки ультразвукового метода пропитки обмоток якорей тяговых электродвигателей тепловозов показала эффективность применения ультразвуковых колебаний для целей интенсификации массообменных процессов в граничных слоях жидкости.

7. Натурные испытания якорей, с дальностью пробега до 278 тыс. км в различных климатических условиях Сибири, показали, что ультразвуковая пропитка изменяет теплофизические параметры лаковой пленки, характеризуемые существенным улучшением диэлектрической характеристики изоляции обмоток тяговых электродвигателей тепловозов.

8. Результаты эксплуатационных испытаний якорей тяговых электродвигателей тепловозов позволили внедрить в производство ультразвуковой метод интенсификации массообменных процессов в граничных слоях жидкости и внести этот метод в правила по ремонту подвижного состава РЖД.

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Ванчиков, В.Ц.** Критерий Рейнольдса при оценке процесса самоукладки неподвижных слоев жидкости на стенке капилляра [Текст] / В.Ц. Ванчиков // Вестник машиностроения. – 2010. – № 5. – С. 41 – 43.

2. **Ванчиков, В.Ц.** Потенциальная энергия молекулярной связи в неподвижном граничном слое воды [Текст] / В.Ц. Ванчиков // Вестник машиностроения. – 2010. – № 7. – С. 30 – 32.
3. **Ванчиков, В.Ц.** Гидротехнические аналоги облитерирующего атеросклероза сосудов и аспекты эндоекологии [Текст]/ В.Ц. Ванчиков // Вестник машиностроения. – 2011. – № 4. – С.37 – 40.
4. **Ванчиков, А. В.** Упрочнение многослойного покрытия деталей машин [Текст] / А. В. Ванчиков, В.Ц. Ванчиков // Вестник машиностроения. – 2011. – № 6. – С. 64 – 68.
5. **Ванчиков, В.Ц.** Анализ публикаций по использованию управления граничным слоем жидкости технологических возможностей / В.Ц. Ванчиков, А. В. Ванчиков // Вестник машиностроения. – 2011. – № 8. – С. 40 – 44.
6. **Ванчиков, В.Ц.** Упрочнение многослойной пленки жидкости в нанотехнологиях / В.Ц. Ванчиков, А.Ю. Мухопад, А. В. Ванчиков, Ю.Ф. Мухопад // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 4. – С. 40 – 47.
7. **Ванчиков, А. В.** Использование свойств граничного слоя вязкой несжимаемой жидкости в технологии машиностроения [Текст] / А. В. Ванчиков, В. Ц. Ванчиков // Вестник машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 27 – 30.
8. **Ванчиков, А. В.** Эффект прилипания частиц вязкой несжимаемой жидкости к стенкам капилляров при числе Рейнольдса  $Re = 6,3$ . [Текст] / А. В. Ванчиков, В. Ц. Ванчиков, Л. М. Истомина // Вестник машиностроения. – 2013. – № 6. – С. 59 – 62.
9. **Ванчиков, А. В.** Определение сопротивления граничного слоя вязкой несжимаемой жидкости сдвиговым усилиям в капиллярах гидросистем [Текст] / А. В. Ванчиков, В. Ц. Ванчиков, Г. К. Хомяков, Л. М. Истомина // Вестник машиностроения. – 2013. – № 9. – С. 56 – 58.

10. **Ванчиков, В.Ц.** Использование теплогенераторов в вагонном депо [Текст] / В. Ц. Ванчиков, А.Ю. Мухопад, А. В. Ванчиков, Ю.Ф. Мухопад // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 3. – С. 267–269.
11. **Ванчиков, А. В.** Особенности течения топлива через форсунки теплогенератора при пуске его в холодное время года [Текст] / В. Ц. Ванчиков, Р. А. Данеев, А. В. Данеев // Вестник машиностроения. – 2013. – № 10. – С. 81 – 82.
12. **Ванчиков, В.Ц.** Облитерация при течении жидкости в капиллярах [Текст] / А. В. Ванчиков, В. Ц. Ванчиков, Г. К. Хомяков, Л. М. Истомина // Вестник машиностроения. – 2014. – № 1. – С. 60 – 62.
13. **Ванчиков, В.Ц.** Исследование процесса облитерации капилляров в гидросистемах и теория вихревого движения [Текст] / В. Ц. Ванчиков, Р. А. Данеев, А. В. Данеев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 5. – С. 40 – 45.

#### **Патенты, изобретения:**

14. Пат. 2443997 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G01N 15/00. Способ восстановления проницаемости полупроницаемых стенок графитовых трубок гиперфилтрационных установок [Текст] / Ванчиков В.Ц., Ванчиков А.В.; заявитель и патентообладатель Иркутский госуд. ун-т путей сообщения. – № 2010137434/28; заявл. 08. 09. 2010; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6. – 7 с.: ил.

15. Пат. 2457463 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G01N 13/00. Способ упорядочения структуры неподвижного граничного слоя вязкой несжимаемой жидкости [Текст] / Ванчиков В.Ц., Ванчиков А.В.; заявитель и патентообладатель Иркутский госуд. ун-т

путей сообщения. – № 2010150814/28; заявл. 10. 12. 2010; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21. – 5 с.: ил.

**16. Пат. 2487196 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С25В 1/02, С01В 3/08.** Способ получения водорода для топливных элементов [Текст] / Ванчиков В.Ц., Ванчиков А.В.; заявитель и патентообладатель Иркутский госуд. ун-т путей сообщения. – № 2010150807/04; заявл. 10. 12. 2010; опубл. 10. 07. 2013, Бюл. № 19. – 7 с.: ил.

**17. Пат. 2538018 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В05В 17/00.** Способ дискретного получения ламинарной компактной струи жидкости [Текст] / Ванчиков В.Ц., Ванчиков А.В., Данеев Р.А., Данеев А.В.; заявитель и патентообладатель Иркутский госуд. ун-т путей сообщения. – № 2013110998/05; заявл. 12.03.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 26. – 4 с.: ил.

**В других периодических изданиях и сборниках научных трудов:**

**18. Ванчиков, В.Ц.** Течение воды в капиллярах [Текст] / В.Ц. Ванчиков, Г. К. Хомяков, Ю.Ф. Мухопад // Сборник научных трудов. Региональная науч.-практ. конф. «Вода и жизнь» Иркутск: ИрГТУ, 2010. С. 15.

**19. Ванчиков, В.Ц.** Об элементарных вихрях вблизи существенно особой точки А.Н. Панченкова [Текст] / В.Ц. Ванчиков, А. В. Данеев // Сборник научных трудов. «Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте» Иркутск: ИрГУПС, 2013. Вып. 22.

20. **Ванчиков, В.Ц.** Информационные аспекты функционирования сложных систем [Текст] / В.Ц. Ванчиков, А. В. Данеев, Р.А. Данеев // Сборник научных трудов. Всероссийская науч.-практ. конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» Иркутск: ИрГУПС, 2013. С. 8.
21. **Ванчиков, В.Ц.** Водородное топливо для топливных элементов [Текст] / В.Ц. Ванчиков, А. В. Данеев // Сборник научных трудов. Всероссийская науч.-практ. конф. «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» Иркутск: ИРННТУ, 2015. С. 54-57.
22. **Vanchikov, V. Ts. Effect of adhesion of the particles of flow of fluid to the capillary walls** [Text] / Ts. V. Vanchikov, A.V. Vanchikov, A.V. Daneev, V.A. Rusanov, L. V. Antonova // *Advances and Applications in Fluid Mechanics*. – 2015. – V. 17. – № 1. – P. 61–69.