

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Цаплина Алексея Ивановича

на диссертационную работу Ванчикова Виктора Цыреновича, тема

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

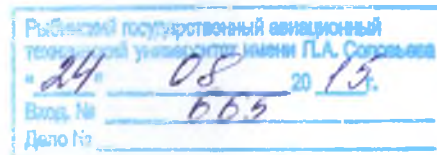
на соискание учёной степени доктора технических наук

по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность диссертации. Диссертационная работа посвящена изучению гидродинамики и тепломассопереноса в капиллярных каналах. С уменьшением диаметра капилляра определяющим фактором становится доминирующая роль поверхности раздела, в котором проявляются атомно-молекулярная свойства вещества, волновая природа процессов переноса. В различных областях техники для интенсификации тепломассопереноса в испарителях-конденсаторах энергетических устройств, паровых котлах, тепловых насосах, при капиллярной пропитке, фильтрации жидкости и другими поверхностными явлениями в различных технологических процессах возникают проблемы проектирования эффективно работающих устройств.

Практическому использованию эффекта адгезии частиц жидкостного потока к стенкам капилляров (облитерация) препятствует недостаточная изученность механизма тепломассообменных процессов в граничных слоях жидкости, происходящих под действием энергии потока. Отсутствуют физические модели, адекватно описывающие прилипание молекул частиц потока жидкости к стенкам капилляров, рост граничного слоя по длине капилляра, влияние внешних воздействий на интенсивность течения.

Применение современного аппарата физического и математического моделирования позволяет более детально изучить проблему интенсификации процесса конвективного тепломассообмена в граничных слоях жидкости, пропускаемой через капиллярно-щелевые системы. Поэтому диссертация В.Ц. Ванчикова, посвященная разработке теоретических основ и созданию методов интенсификации процесса конвективного массообмена в граничных слоях жидкости, обеспечивающих повышение производительности промышленных технологий и эффективности капиллярно-щелевых систем охлаждения энергонапряженных конструкций, восполняет пробел в соответствующей области научных знаний и является актуальной.



Научная новизна и новые результаты. В работе на основе методов теории подобия впервые описана динамика роста пленки граничного слоя в капилляре, позволяющая прогнозировать интенсивность протекания жидкости (перколяцию).

На основе анализа сил взаимодействия молекул, возникающих на границе раздела потока жидкости и поверхности твердого тела, установлено постоянство произведения времени наполнения мерного сосуда фиксированной и малой емкости на площадь поперечного сечения капиллярной трубки. Разработан экспериментальный метод определения этих сил. В результате установлена разновидность ламинарного течения жидкости, сопровождаемого прилипанием молекул частиц потока к стенкам капилляров при числе Рейнольдса, равном 6.3, дополняющая известную классификацию видов течения жидкости в гидромеханике. Показано, что критическое значение перколяции, отражающее дискретность микроструктуры граничного слоя, равно 0.16.

Достоинством работы являются предложенные методы и режимы внешних ультразвуковых воздействий на процессы течения в капиллярах, интенсифицирующих процессы переноса за счет восстановления проницаемости в теплообменных аппаратах топливно-энергетического комплекса.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным применением фундаментальных законов и уравнений теплофизики, постановкой экспериментальных исследований с применением метрологически поверенного оборудования, обработкой опытных данных с использованием статистических методов. Адекватность расчетов подтверждается сопоставлением с экспериментами собственными и других авторов.

Практическая ценность работы заключается в разработке методики эффективного тепло- и массообмена в капиллярах и пористых средах. Предложенный ультразвуковой метод интенсификации массопереноса в капиллярной пропитке позволил улучшить диэлектрические параметры изоляции обмоток тяговых электродвигателей тепловозов.

Содержание. В первой главе проведен обзор исследования вязкого подслоя в капиллярах и пористых средах, который показал недостаточность существующих методик, удовлетворяющих задачам совершенствования методов интенсификации массообменных процессов в капиллярных и тонкопленочных технологиях. Показана необходимость дополнительных исследований, которые дают исчерпывающие сведения о процессе увеличения толщины граничного слоя жидкости в зависимости

от режимных характеристик потока, диаметра и материала капилляров. Отмечено, что ультразвуковой метод пропитки позволяет учитывать особенности массообменных процессов в граничных слоях жидкости и существенно повысить качество, долговечность электрической изоляции, обеспечить высокую производительность, экономичность производства пропитки.

Во второй главе описана капиллярно-сталагмометрическая методика экспериментального исследования с использованием теории подобия массообменных процессов в граничных слоях жидкости. Показано, что явление увеличения толщины граничного слоя жидкости с течением времени приводит к линейному закону закрытия просвета капилляров, при этом принципиальное значение в задачах совершенствования тонкопленочных технологий имеет зависимость от материала капиллярных подложек.

В третьей главе определена временная граница перехода процессов переноса массы, импульса и энергии в масштаб макроскопического процесса. При числе Рейнольдса, приблизительно равном 6.3, ламинарное течение жидкости переходит в разновидность, характеризуемую уменьшением просвета капилляров. В результате получен общий вид уравнения расхода, отражающего адгезионные и перколяционные процессы в капиллярных трубках, получена расчетная формула для определения величины силы динамического давления потока на стенки капилляров, показано, что при действии контактных сил дискретность микроструктуры конденсированных тел проявляется как постоянная величина.

В четвертой главе получено дифференциальное уравнение энергии применительно к течению жидкости, сопровождаемому прилипанием ее частиц к стенкам капилляров. На основе представления многослойной адгезии молекул жидкости на внутренние стенки капилляра предложена модель процесса прилипания частиц потока к стенкам капилляров. Показано, что соотношение между тепловым давлением и силами сцепления молекул граничного слоя определяет устойчивость жидкой пленки сдвигающим усилиям, при этом энергия движения молекул потока жидкости на 3 порядка превышает энергию связи молекул на «поверхности» неподвижного граничного слоя жидкости.

В пятой главе обсуждаются методы интенсификации и управления массообменными процессами в тонких пленках, такие, как профилирование конфузорных и диффузорных переходов в гидравлических линиях, совместное воздействие ультразвуковых

колебаний и силы динамического давления потока, применение электрического тока и др.

В шестой главе обсуждаются экспериментальные результаты капиллярно-сталагмометрической методики исследования гидроадгезионных процессов при малых числах Рейнольдса, предлагаются методы интенсификации массообменных процессов в капиллярной и тонкопленочных технологиях с использованием ультразвука, электрического тока, а также энергии излучения. Показано, что при воздействии ультразвуковых колебаний на массообменные процессы, происходящие у стенок капилляров, расход жидкости значительно увеличивается. Создана и получила опытно-промышленную апробацию установка для ультразвуковой пропитки обмоток якорей тяговых электродвигателей тепловозов, улучшающая теплофизические и диэлектрические параметры изоляции.

Замечания и пожелания.

1. В диссертации принята упрощенная ньютоновская модель с постоянной вязкостью. Однако для электроизоляционных лаков, применяемых для капиллярной пропитки обмоток двигателей при ультразвуковых воздействиях в неизотермических условиях, вязкость может зависеть как от температуры, так и от скорости сдвига [Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости М.: Мир, 1964. – 216 с.]. Даже вода в граничном слое капилляра обладает, как указано на стр. 110 диссертации, сдвиговой прочностью, а вязкость неподвижного слоя жидкости на три порядка превышает вязкость потока жидкости [стр. 168 диссертации]. В этих случаях эффективная вязкость [140] отличается от ее постоянного значения. Какова погрешность принятого упрощающего предположения о постоянной вязкости?

2. График зависимости коэффициентов теплоотдачи от высоты канала в статье [179] содержит опечатки, исправленные в тексте этой статьи. Однако на рис. 4.19, заимствованном из этой работы, опечатка повторяется, в результате коэффициенты теплоотдачи оказались нереальными и завышенными на три порядка.

3. На стр. 129 диссертации утверждается, что «перенос тепловой энергии вследствие теплопроводности будет одного порядка с переносом ее движущейся жидкостью», однако на стр. 130 приведено число Пекле, которое противоречит приведенному утверждению, так как характеризует различие этих энергий в 44,3 раза.

4. На стр. 127 диссертации приводятся закон превращения механической энергии во внутреннюю энергию потока в капилляре в

адиабатных условиях (без внешнего теплообмена). Требуется пояснения, каким образом адиабатные условия, характерные для быстро протекающих процессов, реализуются при медленных течениях в капиллярах.

5. Случайные погрешности починяются распределению Гаусса при бесконечно большом числе измерений, а при малом числе измерений, равном 5 (стр. 69 диссертации), эта погрешность уточняется коэффициентом Стьюдента [Цаплин А.И. Основы научных исследований в технологии машиностроения: учеб. пособие. Пермь, изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 228 с.]. Возникает вопрос о погрешностях экспериментальных данных, в частности, приведенных на рис. 2.10...2.14.

6. Переход от плоской задачи к объемной (стр.87) для цилиндрического капилляра целесообразно проводить не в прямоугольной, а в цилиндрической системе координат, учитывающей возрастание площади пограничных слоев с радиусом капилляра.

7. В формуле (3.60) приравниваются подъемная сила для пластинки и сила вязкого трения Стокса для шара. Для какой формы обтекаемого тела эта формула отражает вихревое движение?

8. Утверждение об уменьшении величины пробивного напряжения обмоток якоря на 2,6 кВ при вакуумно-нагнетательной пропитке и на 0,8 кВ при ультразвуковой пропитке (стр. 182) не подтверждается данными рис. 6.35.

В целом при достаточно качественном оформлении автореферата и диссертации имеются замечания. В тексте диссертации имеются опечатки, ошибки в пунктуации, в размерности: размерность коэффициента динамической вязкости (стр. 42) указана неправильно: следует кг/(м·с), а не кг/м·с, массовой скорости (стр.125): следует кг/с, а не кгс. Имеются отклонения в размерностях от системы СИ: давление [кгс/см² на стр. 26], модуль сдвига [дин/см² на стр. 31]. Чтение диссертации затрудняет дублирование обозначений, например, используется одно и то же обозначение λ для длины волны де Бройля, коэффициентов Дарси, теплопроводности, гидравлического трения. Нельзя согласиться с утверждением «физика в целом не объясняет, что такое энергия» (стр. 148). Уравнение И.В. Мещерского, записанное в форме (3.39), не отражает движение тела с переменной массой.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку работы, которая является завершённой, полученные в ней новые теоретические результаты вносят значительный вклад в развитие методов интенсификации процессов массообмена в капиллярных и пористых средах при внешних воздействиях. Следует отметить целесообразность

развития проведенных в диссертации исследований с учетом неньютоновской реологии жидкостей, неоднородности свойств и сопряженных процессов тепло- и массообмена в капиллярных и пористых средах.

Диссертационная работа оформлена за исключением вышеуказанных замечаний в соответствии с требованиями ВАК, ее основные результаты достаточно полно опубликованы в научной печати, в том числе в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях по перечню ВАК, а содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Заключение. Представленная работа по научному уровню и практической значимости удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, является законченным научным исследованием. Автор диссертации, Виктор Цыренович Ванчиков, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

М.И. Цыренович 31.07.2015
(подпись, число)

1. Полное наименование организации – **Пермский национальный исследовательский политехнический университет.**
2. Почтовый адрес с индексом – **614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.**
3. Полное наименование кафедры – **Общей физики.**
4. Фамилия, Имя, Отчество – **Цаплин Алексей Иванович.**
5. Должность, ученая степень, звание – **заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор.**
6. Телефон, адрес электронной почты – **8(3422)19-82-12; tai@pstu.ru; <http://pstu.ru/title1/faculties/fpmm/of/>**

Подпись Цаплина А.И. удостоверяю:

Учёный секретарь

Пермского национального исследовательского
политехнического университета канд. истор. наук

Макаревич Владимир Иванович



(подпись, число)

(печать герб.)