

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (01.04.14)

УДК 536.2

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-86-105

Неисчерпаемые проблемы теплообмена

В.В. Ягов

Рассмотрены проблемы теплообмена, изучавшиеся последние пять лет на кафедре инженерной теплофизики. В процессах теплообмена жидких металлов в условиях подавления турбулентности магнитным полем обнаружены режимы с низкочастотными температурными пульсациями, обусловленными термогравитационной конвекцией и представляющими потенциальную опасность для жидкометаллических систем охлаждения в атомной энергетике и термоядерных установках. Совместная лаборатория ОИВТ РАН — МЭИ, созданная на территории института высоких температур, позволила проводить исследования магнитной гидродинамики и теплообмена при сочетании параметров, близком к условиям реальных систем с жидкометаллическим охлаждением. Численные исследования теплообмена, включая прямое численное моделирование (DNS) однофазных турбулентных течений или процессов в гетерогенных системах, используются как эффективное средство изучения механизмов соответствующих явлений и вместе с тем позволяют решать прикладные задачи, в том числе по хозяйственным договорам. С помощью численных методов выполнена оптимизация металлгидридных систем очистки и компримирования водорода, изучены процессы гидродинамики и теплообмена в воздушных конденсационных установках. Впервые моделирование процессов в экспериментальной секции воздушного конденсатора выполнено в сопряженной постановке с учетом рабочих характеристик газодуляющих устройств. Примером успешного сочетания приближенных аналитических и численных методов анализа является решение задачи о свободной конвекции в крупномасштабных замкнутых объемах при высоких числах Рэлея.

На кафедре широко исследуются процессы гидродинамики и теплообмена в двухфазных системах. В настоящее время выполнено несколько серий экспериментов по конденсации смесей паров воды и этанола с массовой долей спирта 0,8...16 % на поверхности горизонтальных и вертикальных труб, интенсивность теплоотдачи в сравнении с конденсацией чистого водяного пара может возрастать более чем в 4 раза. Проанализированы особенности кипения в микроканалах на гладкой и микроструктурированной поверхностях путем осаждения наночастиц. Разработаны модели уноса и осаждения капель и предложены уравнения для расчета распределения капель между жидкой пленкой и ядром потока в кольцевых двухфазных потоках. Проведены комплексные исследования пленочного кипения недогретой жидкости, создан уникальный массив опытных данных о режимах охлаждения высокотемпературных шаров из трех различных металлов в четырех различных жидкостях при давлении 0,1...1,0 МПа в широком диапазоне недогревов до температуры насыщения. Предложена гипотеза об условиях возникновения режима интенсивного теплообмена при пленочном кипении недогретой жидкости, при котором интенсивность теплообмена в 20...30 раз превышает уровень, отвечающий насыщенности жидкости. Ведутся опытные и теоретические работы по сонолюминесценции и гидролюминесценции при кавитации. Разрабатываются методы моделирования макроскопически проницаемых межфазных границ при численном решении задач теплообмена при фазовых превращениях.

Ключевые слова: жидкие металлы, термогравитационная конвекция, металлгидриды, пористые среды, воздушный конденсатор, высокие числа Рэлея, псевдокапельная конденсация, микроструктура, наночастицы, унос капель, жидкая пленка, пленочное кипение, кавитация.

Для цитирования: Ягов В.В. Неисчерпаемые проблемы теплообмена // Вестник МЭИ. 2017. № 6. С. 86—105. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-86-105.

Inexhaustible Problems of Heat Transfer

V.V. Yagov

The article considers the heat transfer problems studied by the researchers of the MPEI Department of Engineering Thermal Physics (DETP) during the last five years. Modes involving low-frequency temperature pulsations have been revealed during heat transfer with liquid metals under the conditions of turbulence being suppressed by magnetic field; these pulsations, which are caused by thermo-gravity convection, present potential danger for the liquid metal cooling systems used in nuclear power engineering and in nuclear fusion installations. The facilities available at the joint laboratory of the Joint Institute for High Temperatures (JIHT) of the Russian Academy of Sciences and the Moscow Power Engineering

Institute, which was established on the JIHT territory, have opened the possibilities for studying magnetic hydrodynamics and heat transfer for combinations of parameters close to the conditions under which real liquid metal-cooled systems operate. Numerical investigations of heat transfer, including direct numerical simulation (DNS) of single-phase turbulent flows or processes in heterogeneous systems, are used as an efficient tool for studying the mechanisms governing the relevant phenomena. Along with this, they open the possibility to solve applied problems, also within the framework of commercial agreements. Numerical techniques were used to optimize the metal hydride-based hydrogen cleaning and compressing systems and to study the fluid dynamics and heat transfer in air-cooled condensers. The processes taking place in the experimental section of an air-cooled condenser were for the first time simulated in the conjugated statement with taking into account the performance characteristics of gas removal devices. Solution of the natural convection problem in large-scale closed volumes at high Rayleigh numbers is an example of successful combined application of approximate analytical and numerical analysis methods.

Hydrodynamics and heat transfer in two-phase media are widely studied at the Department. A few series of experiments on condensation of ethanol and water vapor mixtures with the mass fraction of alcohol ranging 0.8 to 16% on the surface of horizontal and vertical tubes have been conducted. It has been shown that the heat transfer intensity for such mixtures can increase by more than a factor of 4 as compared with condensation of pure steam. The specific features pertinent to boiling in microchannels on a smooth surface and on a surface microstructured by depositing nanoparticles have been studied. For annular two-phase flows, droplet entrainment and deposition models have been developed, and equations for predicting the distribution of droplets between the liquid film and flow core have been proposed. Comprehensive investigations of film boiling for subcooled liquid have been carried out. A unique array of experimental data on the cooling conditions of high-temperature spheres made of three different metals in four different liquids at pressures ranging from 0.1 to 1.0 MPa in a wide range of subcooling values has been created. A hypothesis about the conditions under which an intensive heat transfer mode may appear during film boiling of subcooled liquid, in which the heat transfer intensity is 20 to 30 times higher than it is during saturated film boiling. Experimental and theoretical investigations of sonoluminescence and hydroluminescence accompanying cavitation in liquids are conducted. Work is underway on developing methods for simulating macroscopically permeable phase interface boundaries in numerically solving heat and mass transfer problems under the conditions of phase transformations.

Key words: liquid metals, thermogravitational convection, metal hydrides, porous media, air-cooled condenser, high Rayleigh numbers, pseudo-droplet condensation, microstructure, nanoparticles, droplet entrainment, liquid film, film boiling, cavitation.

For citation: Yagov V.V. Inexhaustible Problems of Heat Transfer. MPEI Vestnik. 2017; 6:86—105. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-86-105.

Процессы теплообмена органично вписались практически во все реальные технологии, а для энергетики они часто являются определяющими. Экономика России построена таким образом, что прямых заказов «от производства» совсем немного, но сами по себе научные проблемы отнюдь не иссякают, годовые объемы научных журналов, как международных, так и отечественных, растут. Есть в этом приросте научной продукции заметный вклад специалистов кафедры инженерной теплофизики им. В.А. Кириллина, результатам последнего пятилетия посвящена настоящая статья. Цель статьи заключается в обращении к живым проблемам теории и приложений теплообмена.

Однофазная конвекция

В этой области, казалось бы, не осталось задач, которые нельзя было бы «просто посчитать», используя современные возможности компьютеров. Кафедре есть что показать в этом отношении: на прошедшей в марте 2017 г. конференции наши студенты (первого года магистратуры) представляли среди других тем результаты прямого численного моделирования (DNS) турбулентного течения и теплообмена. Двадцать лет тому назад это было доступно только зрелым специалистам, имеющим доступ к вычислительным ресурсам. В том же месяце впервые в МЭИ аспирант Д. Огнерубов защитил кандидатскую диссертацию по DNS процессов гидродинамики и теплообмена жидких металлов в условиях сильного влияния массовых сил (гравитационных и магнитных). Тем не менее, в теплообмене

приоритет останется за экспериментом как за самым убедительным критерием истины. К тому же характерное время счета отдельных режимов при DNS измеряется месяцами, а при высоких числах Рейнольдса (порядка 10^5) этот метод исследований пока не реализуем. На кафедре сложилось разумное сочетание физического эксперимента, численных и аналитических методов исследований.

Экспериментальные исследования теплообмена жидких металлов, несмотря на необычный объект изучения — ртуть, насчитывают почти 50-летнюю историю и в этом отношении являются самыми традиционными для кафедры. Обращение в последние годы к тем конфигурациям канала, направлений течения и магнитного поля, которые воспроизводят реальные условия физических объектов, в которых используется жидкометаллическое охлаждение (термоядерные реакторы и источники нейтронов (ТИН), быстрые ядерные реакторы БРЕСТ), выявило неожиданные эффекты, связанные с взаимодействием основного течения с термогравитационной конвекцией (ТГК) и магнитным полем. Выяснилось, что влияние ТГК может быть очень сильным и вызывать значительные пульсации температуры в потоке металла и в стенке канала. Это в большей мере относится к тяжелым жидкометаллическим теплоносителям, в которых из-за особенностей теплофизических свойств (высокой плотности, низкой теплопроводности) ТГК развивается сильнее, чем, скажем, в жидком натрии. По оценкам [1], влияние ТГК на теплообмен свинца и его сплавов существенно во всех

крупномасштабных ядерных энергетических установках (ЯЭУ), в частности, в БРЕСТ и токамаках. Это может привести к нештатным и даже аварийным ситуациям при работе теплообменных систем.

Крайне опасные режимы теплообмена были выявлены в магнитогидродинамических (МГД) конфигурациях, встречающихся в различных проектах бланкетов токамаков, а именно при опускном течении жидкого металла в трубе в поперечном магнитном поле или при опускном течении в прямоугольном канале в компланарном магнитном поле (вектор магнитной индукции параллелен длинной стороне канала). Последняя конфигурация соответствует индийско-российскому проекту модуля бланкета термоядерного реактора ITER. Обнаружено, что при значениях параметра МГД — взаимодействия, соответствующего полному подавлению турбулентности магнитным полем, в потоке жидкого металла развиваются низкочастотные пульсации температуры очень высокой амплитуды. Проникая в стенку теплообменного канала благодаря теплопроводности, эти пульсации вызывают циклические термические напряжения и могут вести к усталостным разрушениям материала стенки. Конфигурация и осциллограмма, изображенные на рис. 1, относятся к случаю теплооб-

мена в прямоугольном канале в компланарном магнитном поле [2]. Исследован случай одностороннего обогрева, что близко к реальной ситуации в зоне бланкета у первой стенки. Как видно, измеренные микротермопарами пульсации температуры наблюдаются и на внутренней, и на наружной стороне «горячей» и «холодной» стенок канала, т. е. циклическая тепловая волна «пробивает» стенку теплообменного канала насквозь! При этом размах пульсаций близок к перепаду температуры между стенкой и жидкостью, что в реальных условиях токамака может достигать 100...150 °С [1]. Эти низкочастотные почти периодические пульсации температуры не связаны с турбулентными пульсациями скорости, поскольку турбулентность подавлена сильным магнитным полем. Причина их возникновения — развитие в потоке тяжелого жидкого металла вторичных течений термогравитационной природы. Они имеют вид упорядоченных, крупных вихрей, занимающих практически все поперечное сечение теплообменного канала. Подобные вторичные течения могут возникать в крупномасштабных жидкометаллических системах и при отсутствии магнитного поля. Магнитное поле токамака отнюдь не подавляет, а напротив, стабилизирует вторичные вихри, делает связанную с ними

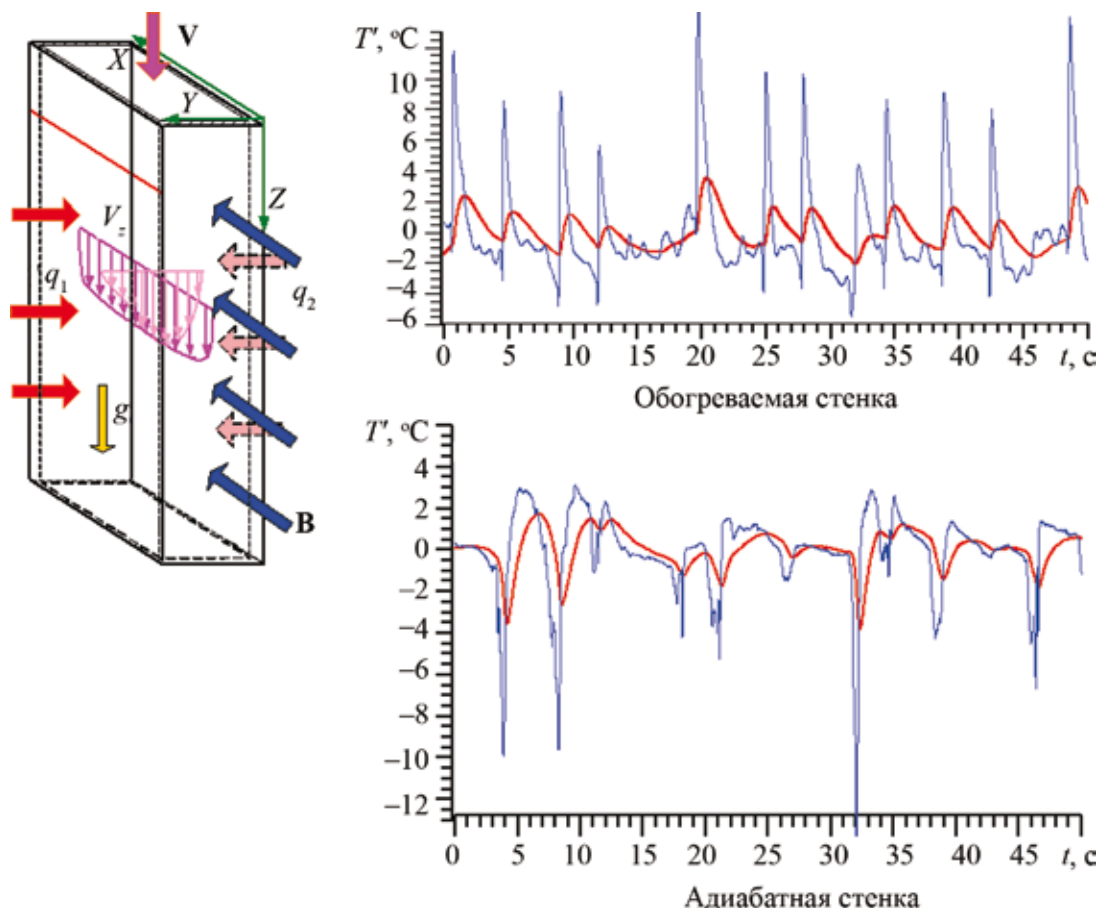


Рис. 1. Конфигурация исследуемого течения и осциллограмма интенсивности температурных пульсаций в поперечном сечении канала:

$$q_1/q_2 = 35/0 \text{ кВ/м}^2; V = 0,25 \text{ см/с}; G_{rq} = 4 \cdot 10^8; \text{Re} = 30\,000$$

термокачку еще более сильной и опасной, поскольку сомнительно, чтобы материал стенки канала мог работать в подобных условиях продолжительное время.

Проектирование систем теплообмена новых ядерных энергоустановок требует детального теплофизического обоснования. Поскольку опасные режимы МГД-теплообмена возникают только при определенных соотношениях режимных критериев Рейнольдса (Re), Грасгофа (Gr) и Гартмана (Ha), речь идет о выявлении областей с «запрещенным соотношением» критериев Re , Gr , Ha , не допустимом при эксплуатации теплообменных систем токамака.

Объединенный коллектив специалистов МЭИ — ОИВТ РАН проводит исследования, не имеющие аналогов в России. Однако отсутствует экспериментальное оборудование, позволяющее исследовать МГД-теплообмен при всех, в том числе достаточно высоких, значениях режимных параметров, актуальных для гибридных токамаков и ТИН. Если модернизацией существующих стендов можно расширить диапазоны чисел Re и Gr до нужных значений, то имеющиеся в распоряжении коллектива электромагниты могут создавать магнитные поля нужной конфигурации, но с индукцией не более 1 Тл, чему соответствует число Гартмана $Ha \approx 1000$. Это втрое меньше минимально необходимого значения для адекватного лабораторного моделирования МГД-теплообмена в условиях ТИН. Научно обоснованная экстраполяция опытных закономерностей на существенно более высокие значения чисел Ha невозможна. Других жидкометаллических МГД-стендов с требуемыми параметрами в России и за рубежом в настоящее время не существует.

В этих условиях руководство ОИВТ РАН приняло решение о выделении в распоряжение объединенной научной группы МЭИ — ОИВТ РАН отдельного лабораторного корпуса для создания новой экспериментальной лаборатории с жидкометаллическим (ртутным) МГД-стендом нового поколения, предназначенным для исследования особенностей гидродинамики и теплообмена в условиях перспективных ЯЭУ. Основу нового стенда составляет уникальный электромагнит, произведенный по нашему техническому заданию специалистами Института ядерной физики (Новосибирск). Магнит с охлаждаемыми медными обмотками создает на длине около 1 м однородное, поперечное по отношению к помещенному в его зазор теплообменному каналу магнитное поле индукцией до 2,7 Тл. Магнит массой 5 т подвешен на опорах на горизонтальной оси с поворотным механизмом, позволяющим плавно поворачивать его на любой угол, придавая ему вертикальное, горизонтальное или наклонное положение. Это делает МГД-стенд универсальным, позволяя исследовать теплообмен при подъемных, опускных и горизонтальных течениях жидкого металла в трубах и каналах различной формы, в широких диапазонах чисел Re , Gr , Ha . Разумеется, запланированы эксперименты

и при нулевом значении числа Гартмана, представляющие интерес для быстрых реакторов. Хотя в настоящее время в мире существует несколько электромагнитов (с «теплыми» обмотками) с близкими значениями магнитной индукции, универсальность и многофункциональность МГД-стенда ОИВТ РАН — МЭИ делает его уникальным.

Существует еще несколько причин считать создаваемую лабораторную базу уникальной. Во-первых, команда ОИВТ РАН — МЭИ единственная использует ртуть в экспериментах по МГД-теплообмену. Ртуть не используется как теплоноситель в ядерной энергетике, однако она является удобной рабочей жидкостью для лабораторного моделирования течения и теплообмена реальных жидкометаллических теплоносителей. При этом можно добиться высокой точности измерений, недостижимой на других жидких металлах.

Во-вторых, используются авторские автоматизированные системы и методы локальных измерений в потоке, основанные на применении зондов различных конструкций и миниатюрных датчиков скорости и температуры (датчики собственного производства: микротермопары, кондукционные и корреляционные датчики скорости, волоконно-оптические преобразователи скорости и давления, многоэлектродные датчики пульсаций скорости и температуры).

В-третьих, широк спектр исследований: коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления, трехмерные поля осредненной температуры, поля скорости, пульсации температуры и различных компонент пульсаций скорости, корреляции между ними. Надежные опытные данные могут использоваться как для проектирования систем теплообмена, так и для валидации компьютерных кодов.

Параллельно с экспериментами авторы проводят исследования тех же конфигураций МГД-теплообмена численными методами. Это позволяет более детально изучить внутренние закономерности процессов, повысить достоверность исследований. Используются методы, основанные на системе усредненных уравнений конвективного теплообмена (RANS) и собственных моделей МГД-турбулентности, а также методы прямого численного моделирования (DNS).

Численное моделирование процессов теплообмена на кафедре опирается на традиции, заложенные еще в 1960-е гг. под руководством Б.С. Петухова. Небольшая по численности научная группа не только активно проводит оригинальные исследования, но и помогает коллегам, в том числе путем предоставления доступа к авторскому CFD коду ANES и необходимой методической помощи в его освоении. Для многих студентов и аспирантов кафедры ИТФ с использованием этого кода начиналось практическое приобщение к самостоятельным численным исследованиям.

Надо сказать, что заказчики с большей охотой идут на хозяйственные договоры, предполагающие числен-

ные исследования как гарантирующие конкретный и достаточно быстрый ответ на возникшие вопросы, чем на финансирование физического эксперимента. По договору с ОАО «НИКИЭТ» в 2014 г. разработаны математические модели и выполнены расчеты турбулентного течения газовой смеси в трактах высокотемпературного газового реактора. Оценено влияние термодиффузии на процессы теплообмена в каналах реактора.

В рамках договора с АО «Иркутсккабель» изучены процессы гидродинамики и теплообмена в протяженных (до нескольких километров) каналах криостатирования высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) кабеля. Особенность указанных каналов заключается в гофрированных стенках, турбулентном режиме течения жидкого азота, неопределенности местоположения кабеля внутри криостата и в отсутствии рекомендаций по расчету гидравлического сопротивления подобных каналов. Чрезмерное падение давления в длинных каналах может привести к кипению азота и аварийной ситуации. Разработаны математические модели и выполнены численные расчеты гидравлического сопротивления и теплового состояния ВТСП кабеля применительно к различным вариантам конструкции криостата и режимным параметрам эксплуатации [3].

Термин «водородная энергетика» появился во время энергетического кризиса 1970-х гг. Тогда перспективы атомной энергетики сомнений не вызывали и создание на этой основе водорода как универсального энергоносителя казалось делом достаточно близкого будущего. Жизнь жестко скорректировала эти надежды, но не остановила разработку технологий производства, хранения, транспортировки и использования водорода. ОИВТ РАН не прекращает исследования в этой области на протяжении нескольких десятилетий. Аккумуляция и очистка водорода в металлгидридных системах — одно из направлений этих исследований, в которых около 20 лет участвует кафедра. В последнее время получено несколько важных результатов в моделировании процессов тепломассообмена в этих системах.

В работах [4, 5] методом прямого численного моделирования для различных типов модельных засыпок получены данные об эффективной теплопроводности пористых сред при отсутствии Кнудсеновских эффектов, гидравлическом сопротивлении при вязкостном режиме течения сквозь пористые среды, о значениях предельных чисел Нуссельта для различных типов упорядоченных структур, а также продемонстрировано отсутствие диффузионного ограничения кинетики сорбции водорода из газовой смеси. На основе полученных результатов уточнены замыкающие соотношения математической модели водородпоглощающей пористой среды. С целью верификации математической модели проведены многочисленные расчеты процессов сорбции/десорбции в различных системах

хранения и очистки водорода [6]. Получено хорошее согласие результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными.

В серии работ [6 — 8] по оптимизации металлгидридных систем циклического действия (систем очистки и компримирования водорода) показана эффективность использования для интенсификации процессов тепло- и массопереноса внутри реактора высокотеплопроводного, высокопористого каркаса из пеноматериалов. Выгода от значительного снижения времени зарядки/разрядки циклически работающих систем существенно превышает затраты на некоторое увеличение их массогабаритных характеристик. При этом удельная производительность металлгидридных систем с пористым каркасом увеличивается до 2 раз.

Уместно заметить, что работы [4 — 8], говоря строго, выходят за рамки понятия «однофазной конвекции». Фактически в этих работах объектом анализа является гетерогенная пористая среда, в которой происходит массоперенос между газовой и твердой фазами, причем расчет этого процесса составляет главный теоретический и прикладной интерес исследований. В реальных технологиях бывает непросто разложить процессы по привычным «полочкам», соответствующим разделам учебника. Это относится и к следующей части новых научных результатов, полученных нашими специалистами по численному моделированию процессов переноса.

Речь идет о масштабных расчетно-теоретических исследованиях процессов гидродинамики и тепло-массообмена в воздушных конденсационных установках нового поколения, выполненных в 2012—2016 гг. [9 — 11]. В ходе этих работ создана комплексная математическая модель для описания сопряженных процессов тепло- и массопереноса в воздушных конденсаторах (ВК). Выполнена верификация данной модели на основе существующих экспериментальных данных. Проведены систематические расчеты для конструктивно различных ВК с целью анализа совокупности протекающих физических процессов. Впервые моделирование процессов в экспериментальной секции ВК выполнено в сопряженной постановке с учетом реальных рабочих характеристик газодуляющих устройств (водокольцевых насосов), определяющих давление на входе в конденсатор (за турбиной). Проанализировано влияние ветровых нагрузок на эффективность работы ВК. Разработаны математические модели вентиляторов и исследованы различные методы противодействия негативному влиянию ветра на эффективность ВК. Выработаны рекомендации по повышению эффективности проектируемых ВК. Созданные математические модели и алгоритмы внедрены в авторский CFD-код ANES и могут использоваться для анализа эффективности разнообразных ВК.

Работы [12, 13] представляют интересный пример сочетания простой физической модели, позволившей

свести трехмерное свободно-конвективное течение к одномерной нестационарной задаче, и численного решения этой задачи. Свободная конвекция при высоких (10^{15} и более) числах Рэлея (Ra) актуальна при проектировании систем аварийной защиты ядерных реакторов, крупных криогенных установок, при моделировании геофизических и метеорологических процессов. Свободная конвекция в крупногабаритном объеме моделировалась одномерным течением в поле силы тяжести в замкнутом тороидальном контуре постоянного сечения (термосифоне). Большой диаметр контура (внешний масштаб) определялся вертикальным размером рассматриваемой задачи, а диаметр малого сечения тора (внутренний масштаб) — из следующих соображений. При движении в конвективном вихре жидкость циклически контактирует с нагретой и холодной стенками. В результате в глубь жидкости за счет теплопроводности (молекулярной, в случае ламинарного движения и эффективной «турбулентной», в случае турбулентного движения) распространяются температурные волны. В системе координат, связанной с жидкостью в конвективном вихре, задача о распространении температурных волн решается аналитически в одномерном приближении. Поскольку температурные волны затухают в жидкости, то в качестве внутреннего характерного масштаба системы (малого диаметра тороидального конвективного вихря) взята характерная глубина проникновения температурных волн. Вне слоя жидкости указанной толщины движение жидкости носит «пассивный» затухающий характер, поэтому в рассматриваемой модели полагается, что данное движение не следует рассматривать, заменив область «пассивной» жидкости твердой стенкой.

Для свободной конвекции в цилиндрической полости, в рамках данной модели, для воздуха, азота и эле-

газа (SF_6) была получена зависимость числа Нуссельта от числа Рэлея. Результаты демонстрируют неожиданно хорошее (в пределах 10 %) совпадение с имеющимися экспериментальными данными по конвекции в полости при числах $Ra = 10^9 \dots 10^{15}$, полученными тремя независимыми научными группами; для больших чисел Ra экспериментальные данные в литературе отсутствуют. На рис. 2 показаны полученные зависимости $Nu(Ra)$ для азота, которые сопоставлены с экспериментальными данными

В результате моделирования числу Рэлея было сопоставлено число Рейнольдса, построенное по внутреннему масштабу задачи, и получена зависимость $Re \sim Ra^{0.25}$. Расчетные данные $Re(Ra)$ и их сопоставление с экспериментом позволяют предположить, что ламинарный режим конвекции в полости может существовать вплоть до $Ra \approx 10^{12}$, что соответствует $Re \approx 2500$. После этого происходит переход к турбулентной свободной конвекции, что на графике зависимости $Nu(Ra)$ выглядит как излом, до которого $Nu \sim Ra^{0.25}$ (эксперимент и расчет), а после излома — $Nu \sim Ra^{0.4}$ (эксперимент и расчет).

Теплообмен при фазовых превращениях

Пленочная конденсация эффективно неподвижно-го пара является едва ли не единственным примером процесса фазового перехода, расчет теплообмена при котором опирается на достаточно строгую теорию В. Нуссельта. На отечественных и международных научных конференциях преобладающее число докладов по конденсации посвящено обычно методам интенсификации теплообмена. В последние годы среди них заметное место занимают исследования псевдокапельной конденсации. Большая часть доступных пу-

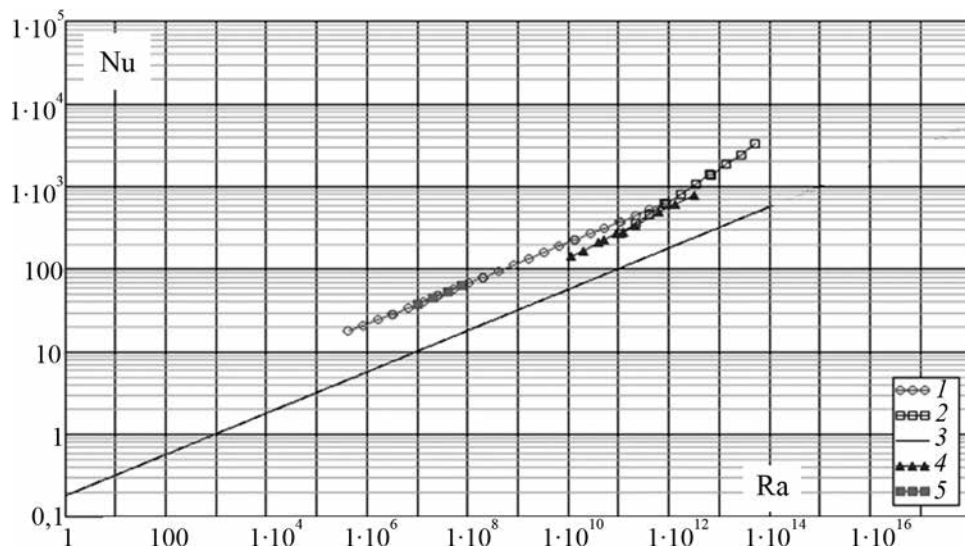


Рис. 2. Естественная конвекция, азот:

1 — расчет, ламинарное течение, $2 \cdot 10^5$ Па; 2 — расчет, турбулентное течение, $2 \cdot 10^5$ Па; 3 — кривая $Nu = 0,18 Ra^{0.25}$, обобщающая данные по конвекции в горизонтальной щели; 4 — эксперимент (D. Funfschilling); 5 — расчет, ламинарное течение, $1 \cdot 10^5$ Па

бликаций (начиная с 2004 г.) принадлежит японским и китайским исследователям, которые показали, что в определенных условиях при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода – этанол и других смесей на горизонтальных и вертикальных трубах и пластинах можно получить такие же высокие коэффициенты теплоотдачи, как при капельной конденсации чистого водяного пара. В данном случае процесс реализуется на смачиваемой поверхности теплообмена, т. е. для его создания не требуется применять гидрофобизаторы. Переход от пленочного режима конденсации к псевдокапельному происходит при конденсации паровых смесей неограниченно смешивающихся жидкостей с сильно различающимися коэффициентами поверхностного натяжения за счет его градиента на поверхности пленки (эффект Марангони).

Упомянутые исследования зарубежных авторов проводились при вынужденном движении паровой смеси относительно поверхности стенки. Изучалось влияние на теплоотдачу при псевдокапельной конденсации состава, скорости и давления смеси, температурного напора пар – стенка, наличия в смеси неконденсирующихся примесей, а также градиента температуры вдоль поверхности теплообмена. Большой научный и практический интерес представляет исследование псевдокапельной конденсации практически неподвижных паровых смесей, особенно при малых концентрациях низкокипящего компонента, когда влияние диффузионного термического сопротивления на теплоотдачу сравнительно невелико.

На кафедре инженерной теплофизики создана экспериментальная установка для исследования теплообмена при конденсации бинарных паровых смесей с автоматизированной системой сбора и обработки информации и управления экспериментом и получены опытные данные по теплоотдаче при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода – этанол [14 – 16]. Исследования проводили на горизонтальной и вертикальной гладких медных трубах с наружным диаметром 12 мм, длиной 100 мм, а также на трех горизонтальных медных трубах с оребрением наружной поверхности. Давление составляло 0,12...0,15 МПа, температурный напор между паром и стенкой (ΔT) изменялся от 2 до 45 К.

Опыты на горизонтальной трубе выполнены с практически неподвижной смесью вода – этанол при массовой концентрации этанола в паровой фазе $c_v = 0,8; 3,9$ и $8,7$ %. При $c_v = 0,8$ % и $\Delta T = 5$ К было получено максимальное значение коэффициента теплоотдачи $42 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что в 2,3 раза выше, чем при пленочной конденсации неподвижного чистого водяного пара. С увеличением концентрации этанола в смеси максимальное значение коэффициента теплоотдачи снижается и достигается при более высоком ΔT . В [14, 15] показано, что результаты измерений хорошо согласуются с данными, полученными Т. Мурасе по псевдока-

пельной конденсации смеси вода – этанол при скорости паровой смеси $0,15 \text{ м/с}$.

Опыты на вертикальной трубе проводили с водяным паром и с практически неподвижной паровой смесью вода – этанол при восьми значениях c_v от 0,4 до 16 %. Максимальный коэффициент теплоотдачи получен для массовой концентрации этанола $c_v = 0,8$ % при $\Delta T = 3$ К; он превышал $90 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, т.е. был в 4,5 раза выше, чем при пленочной конденсации неподвижного чистого водяного пара (рис. 3, а). На рис. 3, б, в для $c_v = 5,5...16$ % можно выделить три участка зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора: участок с относительно низкими значениями коэффициента теплоотдачи, обусловленными значительной ролью диффузионного термического сопротивления; участок, на котором происходит резкий рост коэффициента теплоотдачи в связи с переходом от пленочного режима конденсации к псевдокапельному; ниспадающую часть кривой конденсации, где коэффициент теплоотдачи меняется от максимального значения до величины, соответствующей пленочному режиму конденсации смеси. Опытные данные по конденсации паровой смеси вода – этанол на вертикальной пластине для 1 и 3 % концентрации этанола в паре, представленные на рис. 3, а, согласуются с результатами измерений МЭИ. Отметим, что при близких c_v коэффициент теплоотдачи при псевдокапельном режиме конденсации паровой смеси вода – этанол на вертикальной трубе в области минимальных ΔT больше, а в области максимальных ΔT меньше, чем на горизонтальной трубе. Измерения показали, что начало перехода от пленочного режима конденсации к псевдокапельному соответствует температурному напору пар – стенка, примерно равному разности температур конденсации и кипения (на диаграмме фазового равновесия) для данного состава смеси, что согласуется с данными, полученными другими авторами для движущейся паровой смеси. Через смотровые окна рабочего участка наблюдалась гидродинамическая картина на поверхности трубы и выполнялась скоростная фотосъемка [15].

Впервые получены экспериментальные данные о теплообмене при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода – этанол на горизонтальных оребренных трубах. Исследование выполнено на трех трубах с оребрением прямоугольной формы, отличавшихся расстоянием между ребрами, при изменении c_v от 8,7 до 14,5 %. Наибольшее значение коэффициента теплоотдачи (около $60 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) соответствовало $c_v = 8,7$ % и было в 4 раза выше, чем при пленочной конденсации водяного пара на горизонтальной гладкой трубе, что связано как с развитием поверхности теплообмена за счет оребрения, так и с интенсификацией теплообмена из-за перехода к псевдокапельному режиму конденсации.

На основе обработки опытных данных получены безразмерные обобщающие зависимости для коэффи-

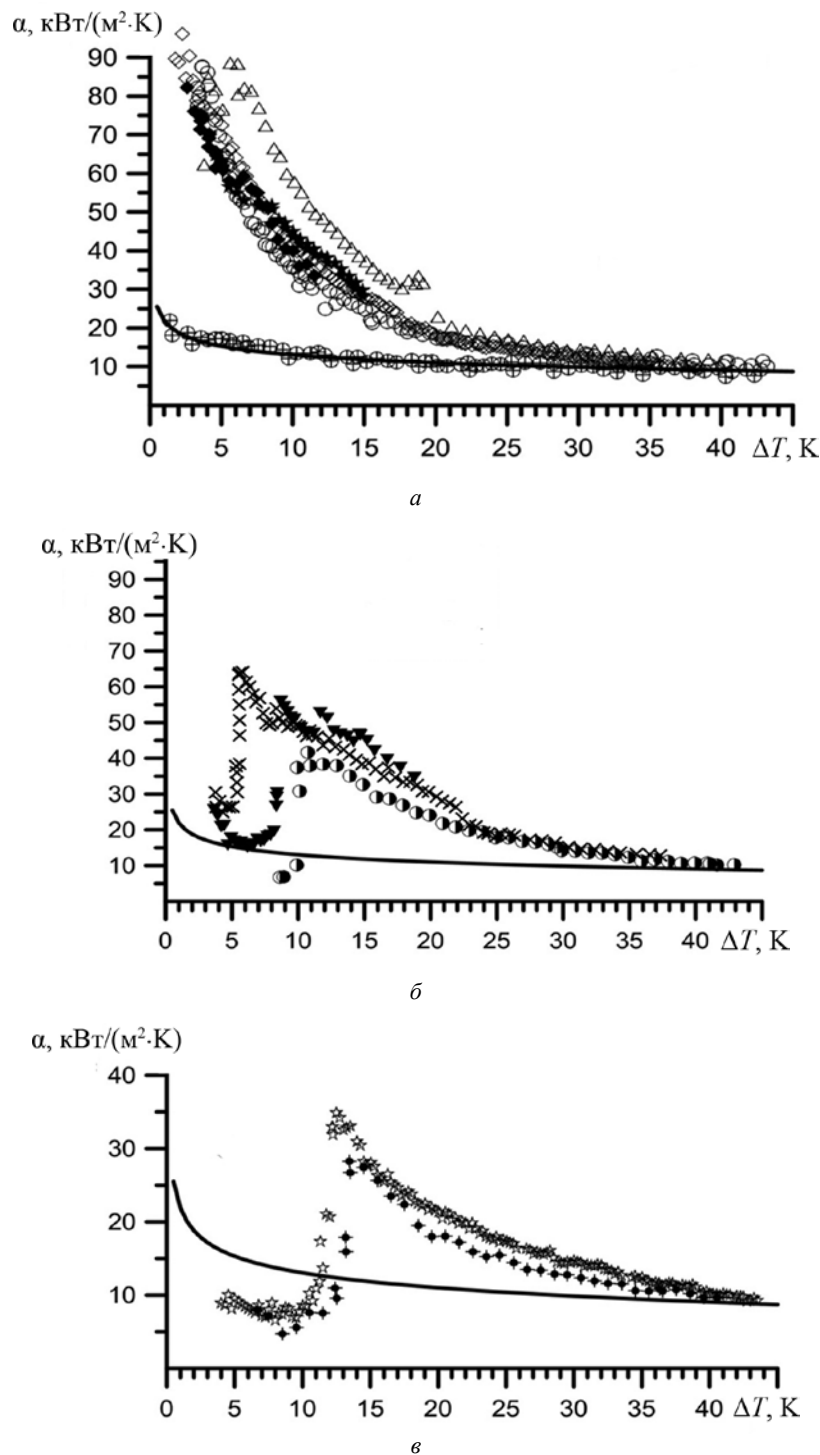


Рис. 3. Зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора пар–стенка при конденсации водяного пара и паровой смеси вода–этанол на вертикальной трубе:

a — $c_v = 0$ (\oplus); 0,4 (\circ); 0,8 (\diamond); 1,9 % (\triangle); опытные данные для конденсации на вертикальной пластине: $c_v = 1$ (\blacklozenge); 3 % (\star); *b* — $c_v = 5,5$ (\times); 7,1 (\blacktriangledown); 12 % (\bullet); *v* — $c_v = 14,4$ (\star); 16 % (\blacklozenge); — — расчет по теории Нуссельта для $c_v = 0$.

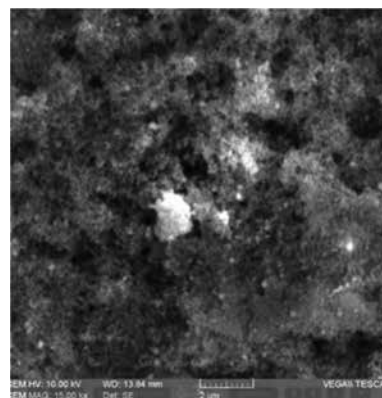
циента теплоотдачи при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода – этанол на горизонтальных и вертикальных гладких трубах [15, 16].

В процессах кипения в последние 20 лет широко исследуются современные методы получения задан-

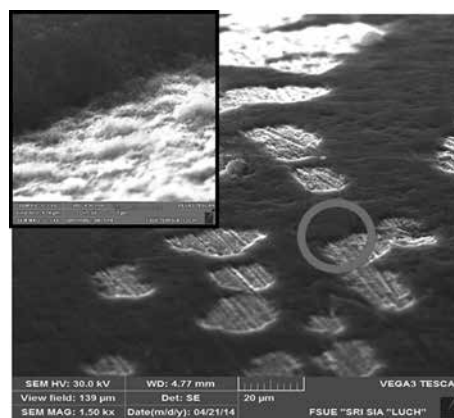
ной микроструктуры поверхности для интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока. На кафедре такие работы проводятся как для кипения в объеме, так и при вынужденном течении в каналах. Из последних результатов необходимо от-

метить исследования теплоотдачи и паросодержания при кипении воды в одиночном горизонтально расположенном микроканале высотой 0,2 мм, шириной 3 мм и длиной 13,7 мм. Верхняя стенка канала сделана из стекла. Методика исследования теплоотдачи в микроканале основана на измерении распределения температуры в медном блоке, представляющем собой тепловой клин [17]. Наночастицы Al_2O_3 наносятся на поверхность нагрева до начала эксперимента. Слой из наночастиц представляет собой трехмерную структуру (рис. 4). Средний размер наночастиц составляет 100 нм. Эксперименты проводили при следующих условиях: $p = 0,1$ МПа, массовая скорость $\rho W = 50...500$ кг/м²·с, недогрев $\Delta T_{sub} = 80$ К.

На рис. 5 представлены зависимости тепловой нагрузки от температуры стенки для микроканала с технически гладкой поверхностью и покрытием из наночастиц Al_2O_3 при массовой скорости 300 кг/м²·с. Кризис теплоотдачи в канале с покрытием из наночастиц возникает при тепловой нагрузке, большей, чем в канале без покрытия на 40...50 % [18, 19]. В переходном режиме кипения также обнаружено увеличение тепловой нагрузки в микроканале с покрытием из наночастиц. Измерены средние значения и пульсации истинного объемного паросодержания при кипении в одиночном микроканале с исходной поверхностью и покрытием из наночастиц Al_2O_3 [20]. Даже при относительно невысокой тепловой нагрузке $q = (0,25...0,3)q_{кр}$ и недогреве жидкости до насыщения на входе 80 К истинное объемное паросодержание во входном сечении микроканала значительно больше нуля из-за реверса потока, возникающего во время роста паровых пузырей.



а



б

Рис. 4. Покрытие из наночастиц Al_2O_3 на поверхностях из нержавеющей стали (а) и никеля (б) толщиной около 1...2 мкм

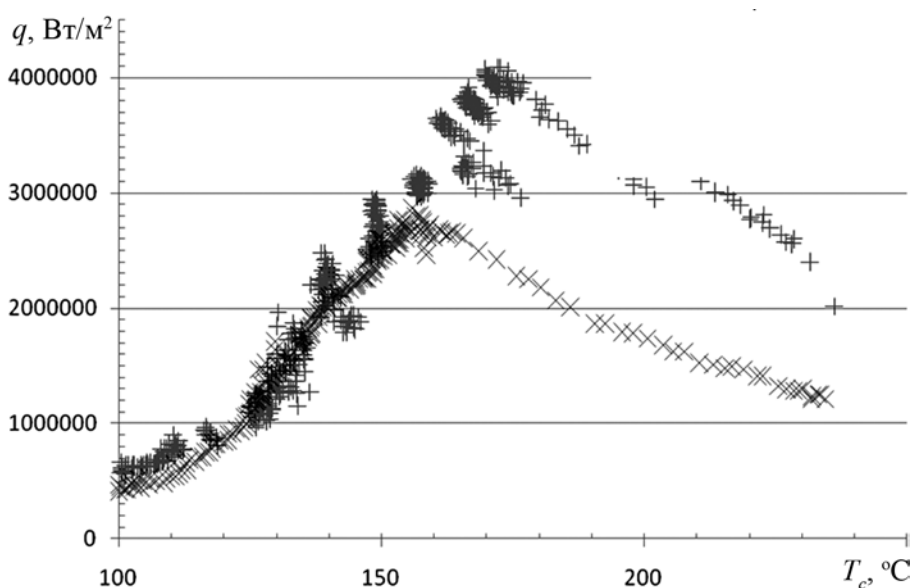


Рис. 5. Зависимость тепловой нагрузки от температуры стенки при кипении воды в микроканале с покрытием из наночастиц и технически гладкой поверхностью при $\Delta T_{sub} = 80$ К; $W = 0,3$ м/с:

+ — нанорельеф; × — исходная поверхность

Кольцевые двухфазные потоки — распространенный тип двухфазных течений, им была посвящена монография G.F. Hewitt, N.S. Hall-Taylor, переведенная на русский язык. За последующие годы по этой тематике, в частности по проблеме уноса и осаждения капель, опубликовано большое число работ. Подавляющее их большинство — опытные исследования и эмпирические корреляции. Новейшее направление в этой области — построение эмпирических уравнений на основе статистической обработки доступного массива опытных данных. На кафедре, начиная с 2012 г., разрабатывается альтернативный подход к моделированию процессов уноса и осаждения капель в таких потоках. В его основу заложены простые модели зарождения волн на поверхности пленки, взаимодействия их с турбулентным газовым потоком, уноса и осаждения капель. Первая из серии работ этого цикла посвящена условиям начала уноса [21]. Принималось, что перед началом уноса течение пленки жидкости ламинарное, газа — турбулентное. Из условия равенства касательных напряжений на стенке и на границе пленки с газом определялась толщина пленки. Построенное по этому масштабу число Вебера (We) определяет критическое значение скорости потока газа, отвечающее началу уноса. Расчетное уравнение с двумя эмпирическими числовыми коэффициентами тестировалось на экспериментальных данных Б.И. Нигматулина по адиабатным пароводяным потокам при давлениях 1...12 МПа. Эти данные, по нашему убеждению, превосходят все известные результаты других исследователей по диапазону режимных параметров, тщательности и точности измерений. Дело в том, что в потоках вода – воздух низкого давления устойчивое подъемное кольцевое течение в вертикальных каналах устанавливается при скоростях газа, превышающих критическую, а именно в таких условиях получено более 70 % доступных данных об уносе и осаждении капель. В работах Б.И. Нигматулина при относительно высоком давлении и подаче жидкости через пористые вставки кольцевая структура формировалась до начала уноса.

На те же опытные данные была ориентирована модель интенсивности уноса капель, поскольку только в этих экспериментах измерялся поток уноса, не осложненный встречным потоком осаждения. Гидродинамический процесс уноса капель предполагает определение нескольких внутренних линейных масштабов задачи: толщина пленки, характерная длина волны, диаметр капли. При этом в условия однозначности входит лишь один размер — внутренний диаметр канала. В рамках принятых допущений удалось установить взаимосвязь внутренних параметров задачи и построить уравнение для плотности потока унесенных капель E в функции от заданных параметров и физических свойств жидкости с точностью до числового множителя [22]. Уравнение воспроизводит обнаруженную в опытах линейную зависимость интенсивности уноса от расходов жидкости и пара.

В большинстве доступных опытных исследований уноса и осаждения капель достигалось динамическое равновесие этих процессов, $E = D$, где D — плотность потока осаждения капель на стенку. Численное моделирование переноса массы в гомогенном парокпельном потоке [23] подтвердило гипотезу о том, что основной механизм осаждения — турбулентная диффузия капель. Для условий равновесия уноса и осаждения в [24] предложено приближенное уравнение для расчета распределения жидкости между жидкой пленкой и газокпельным ядром в дисперсно-кольцевом двухфазном потоке. Существенно, что в это уравнение не вводилось никакой дополнительной коррекции; при этом относительно новые опытные данные по парожидкостным потокам R113, как и наиболее надежные данные Б.И. Нигматулина с сотрудниками по пароводяным потокам, обнаруживают хорошее согласие с расчетом. Они соответствуют приведенному давлению 0,04...0,53.

Для низких приведенных давлений, при которых получено большинство доступных опытных данных о распределении жидкости по сечению канала в газоводяных двухфазных потоках, характерны низкие расходы жидкости в пленке. Для этого случая была проведена модификация уравнения для интенсивности уноса капель. В итоге для условия $E = D$ получено уравнение, хорошо описывающее опытные данные для потоков вода – воздух и вода – гелий при давлении 0,1...0,76 МПа [25]. Определена верхняя граница применимости разработанной методики $Re_L(\rho''/\rho')^{1/4} \leq 700$, где Re_L — число Рейнольдса для потока жидкости в трубе; ρ'' , ρ' — плотность газа и жидкости соответственно.

В последнее время удалось объяснить уникальные результаты экспериментального исследования японских авторов М. Nakazatomi и К. Sekoguchi об уносе капель в водовоздушных потоках высокого (до 20 МПа) давления. При давлении 10...20 МПа обнаружены очень высокие доли потока унесенной (в виде капель) жидкости, кратно превосходящие расчетные по упоминавшейся модели А. Cioncolini, J.R. Thome. В работе [26] на основе имеющейся опытной информации принимается, что при этом давлении жидкая пленка становится тонкой и достаточно гладкой. На ее поверхности образуются короткие волны, с гребней которых с высокой частотой срывается множество мелких капель. Характерная длина волн определяется числом Вебера, а общее число точек срыва капель на единицу поверхности пленки обратно пропорционально квадрату этого линейного масштаба:

$$N \sim \frac{1}{l_0^2} = C_2 \left(\frac{\rho'' w_0'^2}{\sigma} \right)^2.$$

Здесь w_0' — приведенная скорость газа; σ — поверхностное натяжение; константа C_2 имеет порядок 0,01, что отвечает условию начала срыва капель $We \approx 10$.

Этот совершенно новый подход к определению условий срыва в состоянии высокого давления позволил вполне удовлетворительно описать обсуждаемые опытные данные при давлении 10...20 МПа. При меньшем давлении данные М. Nakazatomi, К. Sekoguchi описываются по методике [24].

Рассмотренные проблемы уноса и осаждения капель относятся к широко распространенному типу двухфазных течений и не привязаны к конкретной конструкции. Примером другого типа задач служит исследование теплогидравлических процессов в системе сепаратор – парогенератор теплоутилизационного комплекса, выполненное по договору с ЗАО «Турбокон». Рассчитаны режимы вскипания воды при истечении из сопла, характеризующиеся сильной неравновесностью и сверхзвуковыми скоростями парожидкостной смеси за горлом сопла [27]. Численное моделирование выполнено в двумерной осесимметричной постановке. Разработаны модели для описания движения капель в турбулентном потоке несущей фазы в сепараторе установки, получены оценки эффективности сепаратора и предложены конструктивные решения для ее увеличения.

В рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ, в 2014 — 2016 гг. удалось разобраться в некоторых проблемах пленочного кипения недогретых жидкостей, казавшихся загадочными на протяжении почти 30 лет [28 — 35]. В 1986 г. известные английские ученые G.F. Hewitt, D.B.R. Kenning описали эксперименты, в которых при пленочном кипении воды на поверхности медных сфер с температурой 450...510 °С фиксировали тепловые потоки до 5 МВт/м², если недогрев воды до насыщения превышал 22 К. В отсутствие прямого контакта жидкость – стенка коэффициент теплоотдачи (КТО) составлял несколько кВт/(м²·К), приблизительно в 20 раз выше, чем при пленочном кипении насыщенной жидкости. Объяснение механизмов высокоинтенсивного теплообмена при пленочном кипении недогретых жидкостей было основной целью исследований проекта.

В качестве высокотемпературных тел использовались шары из никеля, нержавеющей стали и меди с покрытием из хрома и карбида хрома толщиной около 10 мкм диаметром 30...51 мм. В начале эксперимента металлический шар устанавливается внутри катушки ВЧ-индуктора; нагретый шар перемещается в объем охлаждающей жидкости на уровень смотровых окон установки. Регистрация сигнала от каждой термопары осуществляется с частотой 100 Гц. Во всех экспериментах при повышенном давлении, а при использовании для охлаждения неводных жидкостей — всегда, нагрев рабочего образца и его последующее охлаждение проводится в среде инертного газа (аргона или азота). В каждом шаре устанавливается 4 или 5 термопар, из которых одна размещается в центре, а остальные в разных точках заподлицо с поверхностью. Термопарный кабель протягивается через каналы диаметром 1 мм, просверленные из верхней точки («северного полюса») шара [28, 29].

Первичные результаты экспериментов — зависимости температуры в разных точках образца от времени (термограммы охлаждения). При интенсивном охлаждении поле температур резко отличается от сферически симметричного. Изучение процесса охлаждения с использованием только одной термопары в центре шара или в какой-либо точке вблизи поверхности (как это делается во всех известных исследованиях) не дает адекватной информации о механизмах теплообмена. Поскольку в таком режиме большие градиенты температуры наблюдаются не только по радиусу шара, но и по полярному углу, восстановление условий на поверхности сферы по первичным термограммам охлаждения требует решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ). В общем случае должна решаться двумерная (осесимметричная) нестационарная ОЗТ. В условиях, когда режим интенсивного охлаждения зарождался в нижней точке шара (южный полюс) и распространялся вверх по поверхности шара, была осуществлена аналитическая аппроксимация температуры поверхности как функции от безразмерного времени (F_0) и полярного угла. Данная функция использовалась в качестве нестационарного граничного условия (первого рода) при решении прямой двумерной нестационарной задачи теплопроводности [29]. При этом расчетное изменение во времени температуры в центре шара сравнивалось с экспериментальной термограммой для этой точки, что служило проверкой надежности решения. Поскольку в процессе проведения экспериментов, прежде всего с водой, из-за изменения свойств поверхности образцов на ней появлялись случайные точки, в которых зарождался режим интенсивного теплообмена, использование какой-либо аналитической функции для аппроксимации поля температуры на поверхности становится проблематичным. Кроме того, для решения главной задачи проекта, выявления механизмов интенсивного теплообмена при пленочном кипении высокая точность расчета теплового потока на стенке не является принципиальной. По этим соображениям в большинстве режимов использовалось усреднение поверхностных термограмм для последующего решения одномерной ОЗТ. Это упрощение обеспечивает куда более реалистичную информацию о процессе охлаждения, чем в тех исследованиях, где температура регистрируется только в одной точке. Прямое сравнение показывает, что плотности теплового потока, рассчитанные методом сосредоточенной теплоемкости, в режиме интенсивного охлаждения практически в 2 раза ниже, чем результаты, полученные решением одномерной ОЗТ.

В режимах устойчивого пленочного кипения сферическая симметрия полей температуры сохраняется практически на всем участке охлаждения; показания термопар в разных точках шара при фиксированных временах практически совпадают, а разница с температурой центра не превышает 30 К. В таких условиях использование усредненной температуры поверхности для решения одномерной ОЗТ вполне оправданно.

Существование режима интенсивного теплообмена при пленочном кипении недогретой воды было подтверждено в экспериментах на образцах с различными теплофизическими свойствами. Поскольку трудно принять, что это — исключительная особенность воды, была реализована обширная программа исследований на неводных жидкостях. Однако эксперименты показали, что такой режим кипения при атмосферном давлении не возникает: даже при рекордных недогревах ($\Delta T_{sub} = 160$ К для изопропанола, 150 К для этанола и 125 К для перфторгексана) пленочное кипение оставалось устойчивым, с максимальными значениями тепловых потоков, не превышающими 140 кВт/м^2 [31]. Снижение температуры охлаждающей жидкости сопровождается ростом ее вязкости (при указанном недогреве изопропанола число Pr превышает 1800!), поэтому были проведены эксперименты по охлаждению высокотемпературных металлических шаров при повышенном давлении. Это дает возможность изучать влияние высоких недогревов на пленочное кипение жидкостей, не заходя в область аномально большой вязкости. Кроме того, закономерности пленочного кипения недогретых жидкостей при высоком давлении имеют самостоятельный интерес, так как существенно расширяют изученный диапазон свойств жидкости и пара, актуальных для процесса. Естественно, эксперименты по охлаждению горячих шаров при повышенном давлении были проведены и на воде.

В результате создан уникальный массив опытных данных о режимах охлаждения высокотемпературных

шаров из трех различных металлов в четырех различных жидкостях при давлении $0,1 \dots 1,0$ МПа в широком диапазоне недогревов до температуры насыщения. Вода, этиловый и изопропиловый спирты и фторуглерод FC-72 (C_6F_{14} , перфторгексан) как охлаждающие жидкости охватывают большой диапазон изменения теплофизических свойств, важных для изучаемых процессов (теплота парообразования, поверхностное натяжение, вязкость, теплопроводность, плотность пара отличались в пределах, превышающих порядок величины). Значения недогрева жидкостей, достигнутые в экспериментах, намного превосходят те, что были изучены в известных прежних исследованиях.

Поскольку охлаждение в неводных жидкостях при всех исследованных условиях проходило обычно в режиме устойчивого пленочного кипения, закономерности интенсивного пленочного кипения недогретой воды изучалось особенно тщательно при разном сочетании давления, недогрева и материала рабочего участка. Интенсивный режим теплообмена при пленочном кипении воды наблюдался на всех исследованных образцах при недогревах от 30 К. Сопоставление экспериментальных термограмм охлаждения в недогретой воде шаров из разных металлов показало, что при одинаковых внешних условиях переход к режиму интенсивного теплообмена происходит быстрее на образцах из нержавеющей стали, т.е. при наименьшем значении коэффициента тепловой активности материала (рис. 6). При этом на поверхности стальной сферы кратковременно ($0,2 \dots 0,3$ с) достигались наибольшие зна-

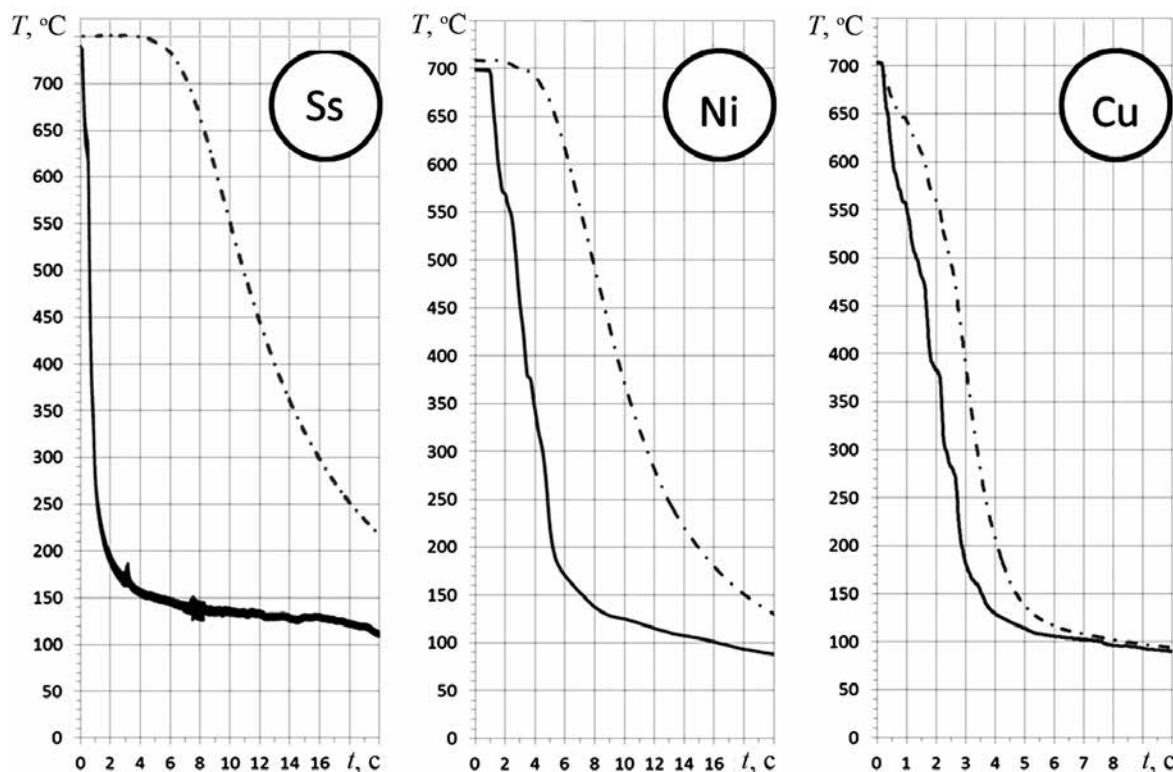


Рис. 6. Термограммы охлаждения (усредненные по поверхности и для центра) шаров из нержавеющей стали, никеля и меди в недогретой воде ($\Delta T_{sub} = 70$ К) при атмосферном давлении

чения теплового потока (7 МВт/м^2), хотя общее время охлаждения шаров из никеля и меди было меньше [30, 33].

Систематизированные исследования пленочного кипения воды на поверхности с характерным размером, существенно превосходящим капиллярную постоянную, при давлении до $1,0 \text{ МПа}$ были проведены впервые. Установлено, что режимы интенсивного охлаждения при пленочном кипении наблюдаются при всех исследованных давлениях при недогревах более 25 К до соответствующей температуры насыщения. Температура поверхности сферы во всех этих случаях превышала критическую для воды, что исключало возможность прямого контакта жидкость – стенка. Общая тенденция, отмеченная при всех давлениях, — увеличение средней скорости охлаждения, т. е. уменьшение времени охлаждения от начальных $750 \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры предельного перегрева воды $T_{\text{lim}} \approx 300 \dots 310 \text{ }^\circ\text{C}$ с ростом недогрева до T_3 (рис. 7).

Расчетные значения КТО и тепловых потоков на поверхности сферы в режиме интенсивного теплообмена при пленочном кипении недогретой воды при всех исследованных давлениях ($0,1 \dots 1,0 \text{ МПа}$) лежат в диапазонах $3 \dots 14 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$ и $1,5 \dots 3,5 \text{ МВт/м}^2$ соответственно. Эти значения тепловых потоков вполне привычны для пузырькового кипения воды, при котором соответствующие значения ΔT составляют примерно 20 К . В данном случае эти тепловые потоки отвечают пленочному кипению при $\Delta T = 200 \dots 500 \text{ К}$ на разных этапах охлаждения при различных давлениях.

Важные для понимания закономерностей интенсивного теплообмена при пленочном кипении результаты получены при охлаждении шара в «горячей» воде. При атмосферном давлении охлаждение в воде с температурой $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{sub}} = 10 \text{ К}$) происходит в режиме устойчивого пленочного кипения с достаточно низкими значениями КТО (рис. 7, а). Та же температура

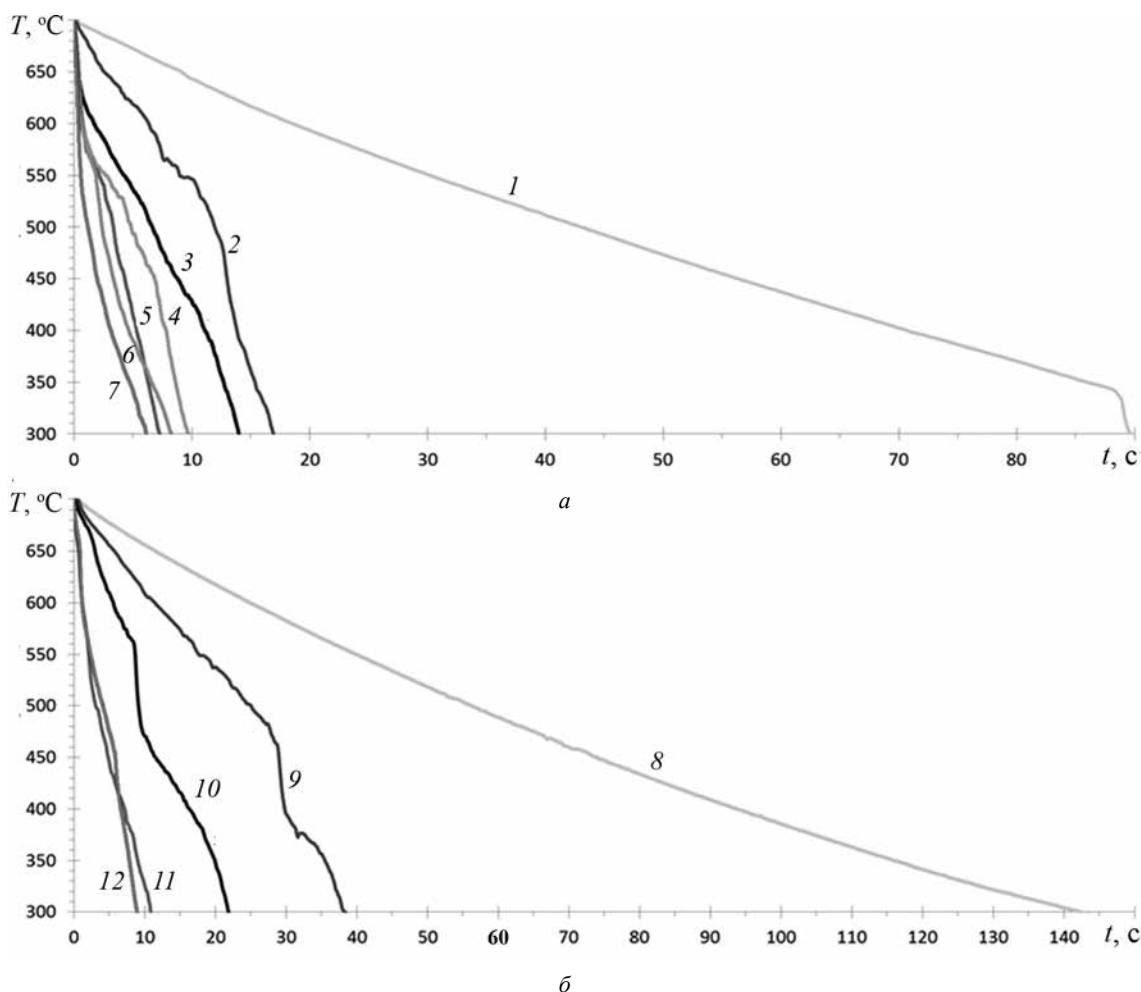


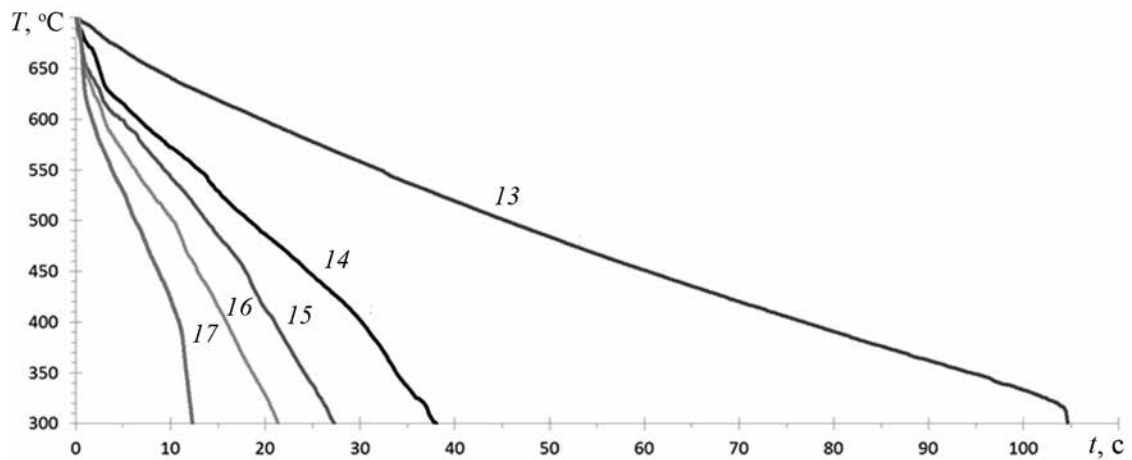
Рис. 7. Изменение усредненной температуры поверхности никелевого шара при охлаждении в воде при разных значениях температуры и давления:

а — $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; б — $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; в — $T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$; г — $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$; 1 — $0,1 \text{ МПа}$; 2 — $0,2 \text{ МПа}$; 3 — $0,3 \text{ МПа}$; 4 — $0,4 \text{ МПа}$; 5 — $0,5 \text{ МПа}$; 6 — $0,7 \text{ МПа}$; 7 — $1,0 \text{ МПа}$; 8 — $0,1 \text{ МПа}$; 9 — $0,2 \text{ МПа}$; 10 — $0,3 \text{ МПа}$; 11 — $0,5 \text{ МПа}$; 12 — $1,0 \text{ МПа}$; 13 — $0,2 \text{ МПа}$; 14 — $0,3 \text{ МПа}$; 15 — $0,5 \text{ МПа}$; 16 — $0,6 \text{ МПа}$; 17 — $1,0 \text{ МПа}$; 18 — $0,5 \text{ МПа}$; 19 — $0,7 \text{ МПа}$; 20 — $1,0 \text{ МПа}$

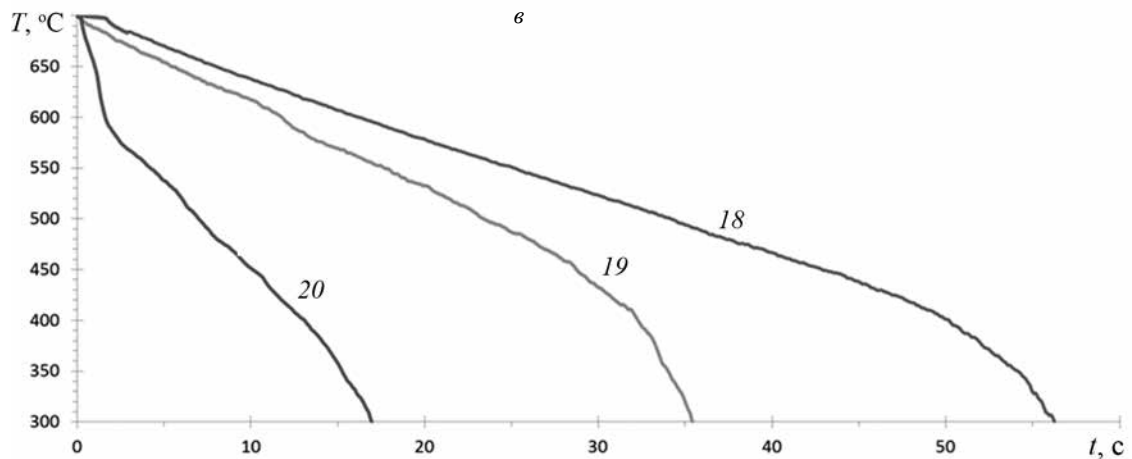
воды отвечает недогревам $\Delta T_{sub} = 62$ и 90 К при давлении $0,5$ и $1,0$ МПа, соответственно; при этих давлениях в опытах температура снизилась на 400 К (от 700 °С) за 7 и 6 с соответственно, тогда как при атмосферном давлении только на 35 К за 7 с. Как и ожидалось, абсолютное значение температуры охлаждающей среды может влиять на процесс только посредством изменения теплофизических свойств жидкости, т.е. очень слабо. Что касается недогрева воды до насыщения, то этот параметр играет ключевую роль в возникновении режима интенсивного теплообмена при пленочном кипении. Показательны экспериментальные данные о режимах теплообмена при охлаждении высокотемпературного образца при фиксированных температурах воды от 80 до 150 °С при различных давлениях до 1 МПа включительно. Самая высокая из этих температур на $1,5$ К отличается от T_s при давлении $0,5$ МПа. При этом давлении охлаждение поверхности до 300 °С проходило в режиме устойчивого пленочного кипения и занимало 56 с (рис. 7, з). При давлении 1 МПа та же температура соответствует недогреву 30 К, что при всех исследованных давлениях примерно опре-

деляет нижнюю границу существования режима интенсивного теплообмена. Время охлаждения ($17,3$ с) и значения КТО ($2,5...3,5$ кВт/м²·К при температуре поверхности выше 380 °С), что в $5...6$ раз выше, чем при пленочном кипении насыщенной жидкости, ясно свидетельствуют о совершенно другом механизме теплообмена [33, 35].

Эксперименты на неводных жидкостях принципиально важны для выяснения причин возникновения режима интенсивного теплообмена при пленочном кипении и его механизма. Массив опытных данных о режимах охлаждения шара из нержавеющей стали в изопропанол и перфторгексане при атмосферном давлении при недогревах до 160 К [31] дополнен результатами экспериментов с этими жидкостями при давлении до 1 МПа с использованием никелевого шара ($D = 45$ мм). Кроме того, проведено несколько серий опытов с этанолом в диапазоне значений давления $0,1...0,9$ МПа на медном шаре того же диаметра и шаре из нержавеющей стали ($D = 40$ мм) [32, 34]. Во всех экспериментах при повышенном давлении температура жидкости поддерживалась фиксированной



6



z

Рис. 7. Окончание

(–25, –15, 0, 25 °С), а недогрев изменялся с температурой насыщения. Оказалось, что и при повышенном давлении большая часть времени охлаждения (40...80 с для изопропанола и 50...105 с для перфторгексана) приходится на режим устойчивого пленочного кипения, даже при рекордно высоких недогревах до насыщения (170 К для изопропанола и 161 К для перфторгексана при давлении 1 МПа). Такие же закономерности выявлены в экспериментах с этанолом на медном шаре.

Опытные данные для повышенных давлений потребовали коррекции расчетного уравнения для теплообмена при устойчивом пленочном кипении недогретых жидкостей, основанного на приближенной физической модели процесса и опытных данных для четырех жидкостей при атмосферном давлении [31]. В [34] дан критический анализ уравнения и выявлены причины расхождения расчетов с опытными данными. Небольшая коррекция уравнения позволила описать весь массив опытных данных (более 160 точек) о пленочном кипении недогретых неводных жидкостей на поверхности шаров из трех различных металлов; данные охватывают значения давления 0,1...1,0 МПа и недогревы 50...170 К. Большой уровень недогрева до насыщения оправдывает использованное в модели допущение о ламинарном течении пара в пленке и жидкости в свободно-конвективном пограничном слое.

Совокупность полученных опытных данных позволила предложить гипотезу об условиях возникновения режима интенсивного теплообмена при пленочном кипении недогретой жидкости. Наличие элементов шероховатости (выступов) охлаждаемой поверхности и волн на межфазной поверхности пар – жидкость может вызывать появление точечных контактов жидкость–стенка. Неустойчивость межфазной поверхности обусловлена движением жидкости на границе с паровой пленкой. Поскольку плотность пара на 2–3 порядка меньше плотности жидкости (для воды и спиртов) в анализе свободно-конвективного подъемного течения недогретой жидкости использовались результаты П.Л. Капицы для стекания гравитационной жидкой пленки. На этой основе получены оценки для волнового числа, частоты и периода волн на межфазной поверхности. Последний из перечисленных параметров можно использовать для оценки времени контакта жидкости с выступами поверхности. Охлаждение выступов поверхности ниже температуры предельного перегрева жидкости представляется тем более вероятным, что некоторые из них могут иметь различия в химическом составе в сравнении с основным материалом охлаждаемого тела. Такие смоченные микроучастки поверхности вполне могут существовать в условиях, когда усредненная температура поверхности намного превышает T_{lim} , при этом вероятность их появления тем выше, чем ниже коэффициент тепловой активности материала.

На границе жидкости, контактирующей с горячей поверхностью, т. е. на линии контакта трех фаз происходит испарение с огромной интенсивностью. В работах, посвященных механизмам теплообмена и кризиса пузырькового кипения, показано, что плотность теплового потока в окрестности линии контакта трех фаз пропорциональна теплоте парообразования h_{LG} поверхностному натяжению σ и обратно пропорциональна кинематической вязкости жидкости ν . Если этот тепловой поток равен или превышает тепловой поток, поступающий в зону интенсивного охлаждения из прилегающих областей охлаждаемого тела, то эта зона будет существовать (или расширяться), создавая условия для высокой средней интенсивности теплообмена. Равенство тепловых потоков, обусловленных интенсивным испарением у границы смоченного участка и притоком теплоты из охлаждаемого тела по механизму нестационарной теплопроводности, определяет условие возникновения режима интенсивного теплообмена при пленочном кипении недогретой жидкости. В качестве «нулевого приближения» этот критерий можно представить как

$$K_0 = (h_{LG} \sigma / \nu) / (\Delta T_0 (\rho c \lambda / t_0)^{1/2}).$$

Здесь ρ , c , λ — плотность, теплоемкость и теплопроводность металла; t_0 — характерное время контакта жидкости с выступами поверхностной шероховатости; ΔT_0 — разность средней температуры поверхности и T_{lim} .

Хотя эта гипотеза пока может рассматриваться как сугубо качественная, два экспериментальных наблюдения служат аргументом в ее пользу. Во-первых, из нее следует, что существенно более высокие значения теплоты парообразования и поверхностного натяжения воды — это те «особые» свойства, которые отличают воду от исследованных спиртов и перфторгексана. Во-вторых, более резкое охлаждение поверхности шаров из металлов с низкой теплопроводностью связано с меньшим значением плотности теплового потока из объема металла к участку с интенсивным охлаждением. В том же направлении влияет на процесс средний перегрев поверхности в сравнении с температурой предельного перегрева жидкости.

Если бы в научном сообществе существовала традиция отмечать юбилеи открытий, выдающихся публикаций, то в этом году был бы подходящий повод: столетие выхода фундаментальной статьи О.М. Рэлея, в которой впервые показано, что схлопывание газовой полости в несжимаемой невязкой жидкости ведет к колоссальной концентрации энергии в малом объеме. Было получено объяснение эрозии металлических поверхностей, обусловленное кавитационным схлопыванием пузырьков в неоднородном поле давлений (вблизи стенки). В дальнейшем исследования кавитации и связанных с ней задач (гидравлический удар, взаимодействие капель и струй с поверхностью, кипение не-

догретой жидкости и др.) развивались быстро по всему миру; в монографии Ф.Г. Хэммита названо около 70 институтов и лабораторий, изучающих эти проблемы. В последние годы теоретические и экспериментальные исследования в этой области проводятся и на кафедре ИТФ НИУ «МЭИ».

Кавитация жидкости под воздействием ультразвука иногда сопровождается достаточно слабым свечением пузырьков (рис. 8) — так называемой сонолюминесценцией. Несмотря на многочисленные попытки объяснения этого явления, его физическая природа так до конца и не выяснена. Конкурируют две гипотезы: «тепловая», объясняющая свечение локальным перегревом среды, и «электрическая», в которой возможной причиной люминесценции предполагаются электрические разряды в наэлектризованной жидкости. Сделать однозначный выбор в пользу какой-то одной теории пока крайне затруднительно.

С другой стороны, у сонолюминесценции имеется «близкий родственник»: гидролюминесценция — свечение жидкости при ее течении в узком канале. Спектры этого свечения представлены на рис. 9. Их анализ [36 — 39] показывает, что источником свечения является сильнонерасовесная плазма, образующаяся в пу-

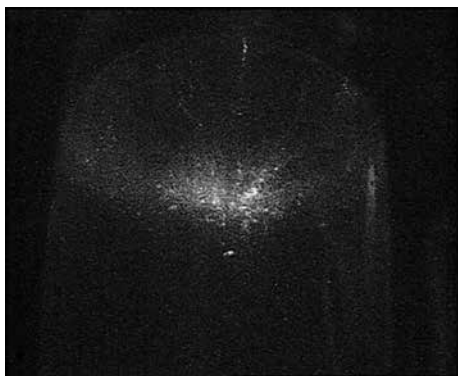


Рис. 8. Сонолюминесценция в объеме глицерина

зырьках жидкости, электризующейся за счет трения о стенку канала.

Вопрос о том, насколько механизм гидролюминесценции переносим на сонолюминесценцию, пока остается открытым. Во всяком случае, электризация жидкости наблюдается и при сонолюминесценции [40]; повреждения ультразвукового волновода, контактирующего с жидкостью в процессе сонолюминесценции, не носят следов высокотемпературного воздействия [41], а температура светящейся жидкости меняется незначительно [42]. Однако специфическая динамика изменения интенсивности сонолюминесценции ставит серьезный вопрос: являются ли электрические эффекты именно причиной свечения или они просто сопровождают сонолюминесценцию, являясь «побочным продуктом» происходящих в жидкости физических процессов [43].

Есть надежда, что ответ на вопрос о физической природе сонолюминесценции будет получен в обозримом будущем.

Одна из принципиальных проблем, возникающая при численном моделировании газожидкостных двухфазных систем — описание макроскопически проницаемых межфазных границ с учетом поверхностного натяжения. На этом направлении усилия были направлены на разработку моделей и алгоритмов метода VOF (Volume of Fluid). На начальном этапе работы тестовые версии различных VOF-алгоритмов были реализованы в авторском CFD коде ANES, что позволило выбрать VOF-алгоритм, наиболее удобный для архитектуры кода. Тестирование алгоритма было проведено на широком классе двухфазных задач с непроницаемой поверхностью. Далее была разработана модель тепло- и массообмена на межфазной поверхности и выполнено моделирование пленочного кипения на горизонтальной поверхности в двумерной и трехмерной постановках [44]. В настоящее время активная работа в этом направлении продолжается.

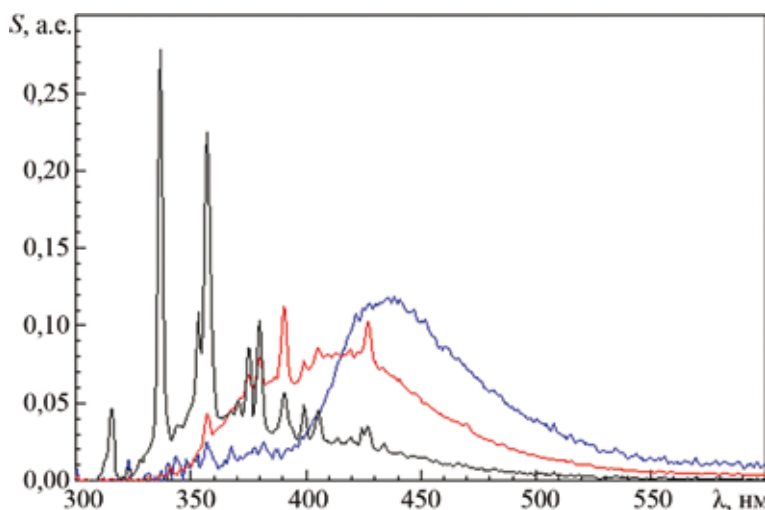


Рис. 9. Спектры гидролюминесценции

В заключение следует сказать, что работа имеет целью дать общее представление об основных направлениях исследований проблем теплообмена и связанных с ним задач гидродинамики на кафедре ИТФ. Представленный список использованной литературы имеет для специалистов самостоятельную ценность, так как помогает сориентироваться в направлениях возможного поиска ответов на возникающие вопросы.

Литература

1. **Генин Л.Г., Свиридов В.Г.** Аварийные режимы теплообмена в термоядерном реакторе // Теплофизика реакторов нового поколения: Тез. докладов. Обнинск: ГНУ РФ-ФЭИ, 2015. С. 87—89.
2. **Поддубный И.И., Разуванов Н.Г.** Исследование гидродинамики и теплообмена при опускном течении жидкого металла в канале прямоугольного сечения в компланарном магнитном поле // Теплоэнергетика. 2016. № 2. С. 13—21.
3. **Artemov V.I., Minko K.B., Yan'kov G.G.** Numerical Simulation of Fluid Flow in an Annular Channel with Outer Transversally Corrugated Wall // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2015. V. 90. Pp. 743—751.
4. **Minko K.B., Artemov V.I., Yan'kov G.G.** Numerical Simulation of Sorption/Desorption Processes in Metal-hydride Systems for Hydrogen Storage and Purification. Pt. I: Development of a Mathematical Model // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2014. V. 68. Pp. 683—692.
5. **Minko K.B., Artemov V.I., Yan'kov G.G.** Numerical Simulation of Sorption/Desorption Processes in Metal-Hydride Systems for Hydrogen Storage and Purification. Pt. II: Verification of the Mathematical Model // Ibid. Pp. 693—702.
6. **Минко К.Б., Артемов В.И., Бочарников М.С., Тарасов Б.П.** Моделирование работы термосорбционного металлгидридного компрессора с интенсификацией теплообмена // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 10. С. 15—22.
7. **Minko K.B., Artemov V.I., Yan'kov G.G.** Numerical Study of Hydrogen Purification Using Metal Hydride Reactor with Aluminum Foam // Appl. Thermal Eng. 2015. V. 76. Pp. 175—184.
8. **Artemov V.I., Minko K.B., Yan'kov G.G.** Numerical Study of Heat and Mass Transfer Processes in a Metal Hydride Reactor for Hydrogen Purification // Intern. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. No. 23. Pp. 9762—9768.
9. **Артемов В.И., Минко К.Б., Яньков Г.Г.** Моделирование процесса конденсации пара из паровоздушной смеси в наклонных трубах воздушного конденсатора // Теплоэнергетика. 2014. № 1. С. 32—43.
10. **Artemov V.I., Minko K.B., Yankov G.G.,** Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer Processes in Air-cooled Condenser // Proc. 15th Intern. Heat Transfer Conf. Kyoto (Japan), 2014. IHTC15-9536.
11. **Артемов В.И., Минко К.Б., Яньков Г.Г., Кириухин А.В.** Моделирование процессов тепломассообмена в экспериментальной секции воздушно-конденсационной установки ЗАО НПВП «Турбокон» // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 14—23.
12. **Глазков В.В., Свешников М.В., Синкевич О.А.** Стационарные течения в замкнутом контуре при подводе и отводе теплоты и отсутствие внешних силовых воздействий // ТВТ. 2015. Т. 53. № 2. С. 225—230.
13. **Синкевич О.А., Свешников М.В.** Ламинарная конвекция газа в замкнутой трубке тока // Инженерная физика. 2016. № 9. С. 55—56.
14. **Чиндяков А.А., Смирнов Ю.Б.** Теплообмен при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода—этанол на гладких и оребренных трубах // Вестник МЭИ. 2013. № 1. С. 46—54.
15. **Чиндяков А.А.** Экспериментальное исследование теплообмена при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода—этанол на гладких и оребренных трубах: Дисс...канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2014.
16. **Чиндяков А.А., Смирнов Ю.Б.** Обобщение опытных данных по теплообмену при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода—этанол на трубах // Вестник МЭИ. 2014. № 2. С. 19—23.
17. **Nomura T. e. a.** Subcooled Flow Boiling in Mini and Micro Channel; Contribution Toward High Heat Flux Cooling Technology for Electronics // Proc. IPACK 2009. San Francisco (USA), 2009.
18. **Кузма-Кичта Ю.А. и др.** Исследование интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с микро- и нанорельефом // Теплоэнергетика. 2014. № 3. С. 35—38.
19. **Kuzma-Kichta Yu.A. e. a.** Boiling Investigation in the Microchannel with Nano-particles Coating // Proc. IHTC, Kyoto, 2014.
20. **Кузма-Кичта Ю.А. и др.** Исследование паросодержания при кипении в микроканале с покрытием из наночастиц // Тепловые процессы в технике. 2015. № 4. С. 156—164.
21. **Минко М.В., Ягов В.В.** Приближенная модель начала уноса капель в дисперсно-кольцевом двухфазном потоке // Вестник МЭИ. 2012. № 2. С. 30—33.
22. **Ягов В.В., Минко М.В.** Моделирование уноса капель в адиабатных дисперсно-кольцевых двухфазных потоках // Теплоэнергетика. 2013. № 7. С. 1—6.
23. **Минко М.В.** Исследование механизмов процесса и разработка методов расчета теплообмена двухфазных потоков в каналах: Дисс. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2012.
24. **Минко М.В., Ягов В.В.** Моделирование распределения жидкости между ядром и пленкой в адиабатных дисперсно-кольцевых двухфазных потоках // Теплоэнергетика. 2014. № 1. С. 68—74.
25. **Ягов В.В., Минко М.В.** Распределение доли унесенной жидкости в адиабатных дисперсно-кольце-

вых потоках при низком расходе в пленке // Теплоэнергетика. 2016. № 4. С. 60—65.

26. **Минко М.В., Ягов В.В.** Распределение жидкости между ядром и жидкой пленкой в газокапельных потоках при высоких приведенных давлениях // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 30—33.

27. **Артемов В.И., Минко К.Б., Яньков Г.Г.** Численное моделирование процессов тепло- и массообмена в сопле и расширителе системы сепаратор-парогенератор теплоутилизационного комплекса // Теплоэнергетика. 2015. № 12. С. 61—69.

28. **Забилов А.Р., Лексин М.А., Ягов В.В.** Закономерности теплообмена в процессах закалки // Вестник МЭИ. 2015. № 1. С. 51—59.

29. **Ягов В.В., Забилов А.Р., Лексин М.А.** Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 70—80.

30. **Yagov V.V. et al.** Film Boiling of Subcooled Liquids. Part I: Leidenfrost Phenomenon and Experimental Results for Subcooled Water // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2016. V. 100. Pp. 908—917.

31. **Yagov V.V. et al.** Film Boiling of Subcooled Liquids. Part II: Steady Regimes of Subcooled Liquids Film Boiling // Ibid. Pp. 918—926.

32. **Забилов А.Р. и др.** Влияние давления на устойчивое пленочное кипение недогретой жидкости // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 6. С. 1487—1497.

33. **Yagov V.V., Zabiroy A.R., Kaban'kov O.N., Minko M.V.** Heat Transfer During Cooling of High Temperature Spheres in Subcooled Water at Different Pressures // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2017. V. 110. Pp. 219—230.

34. **Ягов В.В., Забилов А.Р., Канин П.К., Денисов М.А.** Теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости: новые опытные результаты и расчетные уравнения // ИФЖ. 2017. Т. 90. № 2. С. 287—298.

35. **Забилов А.Р., Ягов В.В., Канин П.К.** Влияние недогрева до насыщения и давления на пленочное кипение воды // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 2. С. 50—59.

36. **Бирюков Д.А., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А.** Измерение и анализ спектра гидрOLUMИНЕСЦЕНЦИИ // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 2. С. 53—57.

37. **Бирюков Д.А., Власова М.Н., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А.** Гидродинамическая люминесценция и гамма-излучение // Вестник МЭИ. 2013. № 1. С. 69—72.

38. **Бирюков Д.А., Власова М.Н., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А.** Свечение жидкости в узком канале как трибolumинесценция // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 5. С. 55—59.

39. **Бирюков Д.А., Власова М.Н., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А.** Электрическое поле внутри воздушного пузырька при гидродинамической люминесценции // ТВТ. 2013. Т. 51. № 4. С. 629—630.

40. **Бирюков Д.А., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А.** ЭлектрИзация жидкости при сонолюминесценции // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 3. С. 90—94.

41. **Biryukov D.A., Gerasimov D.N.** Triboluminescence of Liquid Dielectrics: On a Way to Discover the Nature of Sonoluminescence // Triboluminescence: Theory, Synthesis and Application. Springer, 2016.

42. **Бирюков Д.А., Герасимов Д.Н.** Изменение температуры жидкости в процессе многопузырьковой сонолюминесценции // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 3. С. 113—117.

43. **Бирюков Д.А., Герасимов Д.Н.** Динамика интенсивности многопузырьковой сонолюминесценции // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 11. С. 40—45.

44. **Артемов В.И., Минко К.Б., Яньков Г.Г.** Прямое численное моделирование процессов тепло- и массообмена в двухфазных системах с явно выделенной межфазной поверхностью // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену: Тез. докладов. 2016. Т. 1. С. 266—269.

References

1. **Genin L.G., Sviridov V.G.** Avariynye Rezhimy Teploobmena v Termoyadernom Reaktore. Teplofizika Reaktorov Novogo Pokoleniya: Tez. Dokladov. Obninsk: GNU RF-FEI, 2015:87—89. (in Russian).

2. **Poddubnyy I.I., Razuvanov N.G.** Issledovanie Gidrodinamiki i Teploobmena pri Opusknom Tehenii Zhidkogo Metalla v Kanale Pryamougol'nogo Secheniya v Komplannom Magnitnom Pole. Teploenergetika. 2016;2:13—21. (in Russian).

3. **Artemov V.I., Minko K.B., Yan'kov G.G.** Numerical Simulation of Fluid Flow in an Annular Channel with Outer Transversally Corrugated Wall. Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2015;90:743—751.

4. **Minko K.B., Artemov V.I., Yan'kov G.G.** Numerical Simulation of Sorption/Desorption Processes in Metal-hydride Systems for Hydrogen Storage and Purification. Pt. I: Development of a Mathematical Model. Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2014;68:683—692.

5. **Minko K.B., Artemov V.I., Yan'kov G.G.** Numerical Simulation of Sorption/Desorption Processes in Metal-hydride Systems for Hydrogen Storage and Purification. Pt. II: Verification of the Mathematical Model. Ibid:693—702.

6. **Minko K.B., Artemov V.I., Bocharnikov M.S., Tarasov V.P.** Modelirovanie Raboty Termosorbtsionnogo Metallogidridnogo Komplessora s Intensifikatsiyey Teploobmena. Al'ternativnaya Energetika i Ekologiya. 2013;10:15—22. (in Russian).

7. **Minko K.B., Artemov V.I., Yan'kov G.G.** Numerical Study of Hydrogen Purification Using Metal Hydride Reactor with Aluminum Foam. Appl. Thermal Eng. 2015;76:175—184.

8. **Artemov V.I., Minko K.B., Yan'kov G.G.** Numerical Study of Heat and Mass Transfer Processes in a

Metal Hydride Reactor for Hydrogen Purification. Intern. J. Hydrogen Energy. 2016;41;23:9762—9768.

9. **Artemov V.I., Minko K.B., Yan'kov G.G.** Modelirovanie Protsessa Kondensatsii Para iz Parovozdushnoy Smesi v Naklonnyh Trubah Vozdushnogo Kondensatora. Teploenergetika. 2014;1:32—43. (in Russian).

10. **Artemov V.I., Minko K. B., Yankov G. G.,** Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer Processes in Air-cooled Condenser. Proc. 15th Intern. Heat Transfer Conf. Kyoto (Japan), 2014. IHTC15-9536.

11. **Artemov V.I., Minko K.B., Yan'kov G.G., Kiryuhin A.V.** Modelirovanie Protsessov Teplomassoobmena v Eksperimental'noy Sektzii Vozdushno-kondensatsionnoy Ustanovki ZAO NPVP «Turbokon». Teploenergetika. 2016;5:14—23. (in Russian).

12. **Glazkov V.V., Sveshnikov M.V., Sinkevich O.A.** Statsionarnye Teleniya v Zamknutom Konture pri Podvode i Otvode Teploty i Otsutstvie Vneshnih Silovyh Vozdeystviy. TVT. 2015;53;2:225—230. (in Russian).

13. **Sinkevich O.A., Sveshnikov M.V.** Laminarnaya konvektsiya Gaza v Zamknutoy Trubke Toka. Inzhenernaya Fizika. 2016;9:55—56. (in Russian).

14. **Chindyakov A.A., Smirnov Yu.B.** Teploobmen pri Pseudokapel'noy Kondensatsii Parovoy Smesi Voda-Etanol na Gladkih i Orebrennyh Trubah. Vestnik MPEI. 2013;1:46—54. (in Russian).

15. **Chindyakov A.A.** Eksperimental'noe Issledovanie Teploobmena pri Pseudokapel'noy Kondensatsii Parovoy Smesi Voda-Etanol na Gladkih i Orebrennyh Trubah: Diss...Kand. Tekhn. Nauk. M.: NRU «MPEI», 2014. (in Russian).

16. **Chindyakov A.A., Smirnov Yu.B.** Obobshchenie Opytnykh Danykh po Teploobmenu pri Pseudokapel'noy Kondensatsii Parovoy Smesi Voda-Etanol na Trubah. Vestnik MPEI. 2014;2:19—23. (in Russian).

17. **Nomura T. e. a.** Subcooled Flow Boiling in Mini and Micro Channel; Contribution Toward High Heat Flux Cooling Technology for Electronics. Proc. IPACK 2009. San Francisco (USA), 2009.

18. **Kuzma-Kichta Yu.A. i dr.** Issledovanie Intensifikatsii Teploobmena pri Kipenii Vody na Poverhnosti s Mikro- i Nanorel'efom. Teploenergetika. 2014;3:35—38. (in Russian).

19. **Kuzma-Kichta Yu.A. e. a.** Boiling Investigation in the Microchannel with Nano-particles Coating. Proc. IHTC, Kyoto, 2014.

20. **Kuzma-Kichta Yu.A. i dr.** Issledovanie Parosoderzhaniya pri Kipenii v Mikrokanale s Pokrytiem iz Nanochastits. Teplovye Protsessy v Tekhnike. 2015;4:156—164. (in Russian).

21. **Minko M.V., Yagov V.V.** Priblizhennaya Model' Nachala Unosa Kapel' v Dispersno-kol'tsevom Dvuhfaznom Potoke. Vestnik MPEI. 2012;2:30—33. (in Russian).

22. **Yagov V.V., Minko M.V.** Modelirovanie Unosa Kapel' v Adiabatnyh Dispersno-kol'tsevyyh Dvuhfaznyh Potokah. Teploenergetika. 2013;7:1—6. (in Russian).

23. **Minko M.V.** Issledovanie Mekhanizmov Protsessa i Razrabotka Metodov Rascheta Teploobmena Dvuhfaznyh Potokov v Kanalah: Disc. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: NRU «MPEI», 2012. (in Russian).

24. **Minko M.V., Yagov V.V.** Modelirovanie Raspredeleniya Zhidkosti Mezhdru Yadrom i Plenkoy v Adiabatnyh Dispersno-kol'tsevyyh Dvuhfaznyh Potokah. Teploenergetika. 2014;1:68—74. (in Russian).

25. **Yagov V.V., Minko M.V.** Raspredelenie Doli Unesenny Zhidkosti v Adiabatnyh Dispersno-kol'tsevyyh Potokah pri Nizkom Raskhode v Plenke. Teploenergetika. 2016;4:60—65. (in Russian).

26. **Minko M.V., Yagov V.V.** Raspredelenie Zhidkosti Mezhdru Yadrom i Zhidkoy Plenkoy v Gazokapel'nyh Potokah pri Vysokih Privedennyh Davleniyah. Vestnik MPEI. 2017;4:30—33. (in Russian).

27. **Artemov V.I., Minko K.B., Yan'kov G.G.** Chislennoe Modelirovanie Protsessov Teplo- i Massopere nosa v Sople i Rasshiritele Sistemy Separator-Parogenerator Teploulizatsionnogo Kompleksa. Teploenergetika. 2015;12:61—69. (in Russian).

28. **Zabirov A.R., Leksin M.A., Yagov V.V.** Zakonomernosti Teploobmena v Protsessah Zakalki. Vestnik MPEI. 2015;1:51—59. (in Russian).

29. **Yagov V.V., Zabirov A.R., Leksin M.A.** Nestatsionarnyy Teploobmen pri Plenochnom Kipenii Nedogretoy Zhidkosti. Teploenergetika. 2015;11:70—80. (in Russian).

30. **Yagov V.V. e. a.** Film Boiling of Subcooled Liquids. Part I: Leidenfrost Phenomenon and Experimental Results for Subcooled Water. Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2016;100:908—917.

31. **Yagov V.V. e. a.** Film Boiling of Subcooled Liquids. Part II: Steady Regimes of Subcooled Liquids Film Boiling. Ibid:918—926.

32. **Zabirov A.R. i dr.** Vliyanie Davleniya na Ustoychivoe Plenochnoe Kipenie Nedogretoy Zhidkosti. IFZH. 2016;89;6:1487—1497. (in Russian).

33. **Yagov V.V., Zabirov A.R., Kaban'kov O.N., Minko M.V.** Heat transfer During Cooling of High Temperature Spheres in Subcooled Water at Different Pressures. Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2017;110:219—230.

34. **Yagov V.V., Zabirov A.R., Kanin P.K., Denisov M.A.** Teploobmen pri Plenochnom Kipenii Nedogretoy Zhidkosti: Noye Opytnye Rezultaty i Raschetnye Uravneniya. IFZH. 2017;90;2:287—298. (in Russian).

35. **Zabirov A.R., Yagov V.V., Kanin P.K.** Vliyanie nedogreva Do Nasyshcheniya i Davleniya na Plenochnoe Kipenie Vody. Teplovye Protsessy v Tekhnike. 2017; 9;2:50—59. (in Russian).

36. **Biryukov D.A., Gerasimov D.N., Sinkevich O.A.** Izmerenie i Analiz Spektra Gidroluminestsentsii. Pis'ma v ZHTF. 2012;38;2:53—57. (in Russian).

37. **Biryukov D.A., Vlasova M.N., Gerasimov D.N., Sinkevich O.A.** Gidrodinamicheskaya Lyuminestsentsiya i Gamma-izluchenie. Vestnik MPEI. 2013;1:69—72. (in Russian).

38. **Biryukov D.A., Vlasova M.N., Gerasimov D.N., Sinkevich O.A.** Svechenie Zhidkosti v Uzkom Kanale kak Tribolyuminesentsiya. Optika i Spektroskopiya. 2013;114;5:55—59. (in Russian).

39. **Biryukov D.A., Vlasova M.N., Gerasimov D.N., Sinkevich O.A.** Elektricheskoe Pole Vnutri Vozdushnogo Puzyr'ka pri Gidrodinamicheskoy Lyuminesentsii. TVT. 2013;51;4:629—630. (in Russian).

40. **Biryukov D.A., Gerasimov D.N., Sinkevich O.A.** Elektrizatsiya Zhidkosti pri Sonolyuminesentsii. Pis'ma v ZHTF. 2014;40;3:90—94. (in Russian).

41. **Biryukov D.A., Gerasimov D.N.** Triboluminescence of Liquid Dielectrics: On a Way to Discover the Nature of Sonoluminescence. Triboluminescence: Theory, Synthesis and Application. Springer, 2016.

42. **Biryukov D.A., Gerasimov D.N.** Izmenenie temperatury Zhidkosti v Protsesse Mnogopuzyr'kovoy Sonolyuminesentsii. Teplovye Protsessy v Tekhnike. 2017;9;3:113—117. (in Russian).

43. **Biryukov D.A., Gerasimov D.N.** Dinamika Intensivnosti Mnogopuzyr'kovoy Sonolyuminesentsii. Pis'ma v ZHTF. 2017;43;11:40—45. (in Russian).

44. **Artemov V.I., Minko K.B., YAn'kov G.G.** Pryanoe Chislennoe Modelirovanie Protsessov Teplo- i Massoobmena v Dvuhfaznyh Sistemah s Yavno Vydelennoy Mezhfaznoy Poverhnost'yu. XV Minskiy Mezhdunarodnyy Forum po Teplo- i Massoobmenu: Tez. Dokladov. 2016;1:266—269. (in Russian).

Сведения об авторе

Ягов Виктор Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры инженерной теплофизики им. В.А. Кириллина НИУ «МЭИ», e-mail: YagovVV@mpei.ru

Information about author

Yagov Viktor V. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Engineering Thermophysics named by V.A. Kirillin Dept., NRU MPEI, e-mail: YagovVV@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 10.05.2017