

КИПЕНИЕ В ПУБЛИКАЦИЯХ ТВТ: ОТ БАЗОВЫХ МЕХАНИЗМОВ К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

© 2023 г. А. Н. Павленко*

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

**E-mail: pavl@itp.nsc.ru*

DOI: 10.31857/S0040364423060133

В рамках данного номера, посвященного 60-летнему юбилею журнала “Теплофизика высоких температур” (ТВТ), по направлению “Тепломассообмен и физическая газодинамика” хотелось бы провести краткое обсуждение работ по исследованиям теплообмена и кризисных явлений при кипении, опубликованных в журнале ТВТ за этот довольно протяженный период. Целью данной работы не является детальный анализ результатов представленных в журнале работ в сопоставлении с многочисленными работами отечественных и зарубежных специалистов, работающих в данной весьма обширной области, что представляет существенно более масштабную задачу. Здесь автор стремится на основе рассмотренных статей, опубликованных в ТВТ, показать основные этапы и тенденции в развитии исследований в течение 60 лет по изучению процессов теплообмена и развития кризисных явлений при кипении в различных гидродинамических условиях. Можно смело сказать, что спектр публикаций в ТВТ по данной тематике достаточно в полной мере ее отражает, учитывая общепризнанный высокий уровень и широту исследований в СССР и России на протяжении этих лет.

В июле 1963 г. вышел в свет первый номер журнала “Теплофизика высоких температур”. В предисловии к номеру [1] академик В.А. Кириллин писал: “Теплофизика, являясь одним из старейших направлений физики, совершенно очевидно переживает в настоящее время свое второе рождение. Современная теплофизика представляет собой тесное переплетение термодинамики и науки о теплообмене с газодинамикой, магнитной гидродинамикой, физикой плазмы, рядом положений физики твердого тела, физической оптикой, многими вопросами физической химии и рядом других наук. Особенностью современной теплофизики является широкое применение экспериментальных методов исследования. ... Важной особенностью подавляющего большинства направлений новой техники является чрезвычайно большая интенсификация рабочих процессов в соответствующих установках и аппаратах”. Се-

годня, спустя 60 лет, мы в полной мере имеем все основания повторить эти слова. Ярким примером, наглядно демонстрирующим приведенное заключение академика В.А. Кириллина, является история развития исследований в области теплообмена при кипении и тех приложений, где используется данный высокоэффективный режим теплообмена.

Сегодня можно наблюдать своеобразный “ренессанс” в исследованиях теплообмена, переходных процессов и кризисных явлений при кипении и испарении в различных гидродинамических условиях, включающих кипение в большом объеме, при вынужденном течении в каналах и мини- и микроканалах, при пленочных течениях жидкости, при спрейном и струйном орошении тепловыделяющей поверхности, в тонких слоях жидкости, в условиях микрогравитации и в поле значительных массовых сил. Заметное увеличение с каждым годом числа исследований, посвященных проблемам теплообмена при кипении и испарении, объясняется появлением и развитием новых высокоэффективных и комплексных методов экспериментального и теоретического исследования, серьезными успехами в материаловедении, а также связано с решением новых крупных прикладных задач. Развитие новых современных экспериментальных методов дает возможность получать более глубокую и полную информацию об особенностях механизма теплообмена при кипении и испарении, исследовать динамику испарения микрослоя жидкости, нестационарного теплообмена в окрестности отдельных центров парообразования, получать данные для численного моделирования роста отдельных пузырей, изучать взаимосвязь параметров структурообразования с локальным и интегральным теплообменом, развитием кризисных явлений. Анализ докладов, представленных на последних 16-й и 17-й международных конференциях по теплообмену (ИНТС-16: г. Пекин, август 2018 г.; ИНТС-17: г. Кейптаун, август 2023 г.), убедительно подтверждает, в частности, что исследования интенсификации теплообмена при кипении и испарении за счет модификации/структурирования поверхности кипения являются одними

из самых актуальных исследовательских задач в теплофизике. На каждой из данных наиболее крупных международных конференций по теплообмену представлялось около 200–250 докладов (из общего количества докладов — более 1000), так или иначе связанных с изучением теплообмена при кипении и испарении, из которых больше половины было связано именно с вопросами интенсификации теплообмена при модификации/структурировании теплообменной поверхности.

Совершенно закономерно, что в первые десятилетия большинство публикуемых в ТВТ работ в рассматриваемой области были направлены на детальное изучение основных механизмов, определяющих интенсивность теплообмена, возникновение и развитие кризисных явлений при кипении. Следует отметить, что в предшествующий созданию журнала ТВТ период большинство статей отечественными учеными по данной тематике публиковались в таких журналах, как “Теплоэнергетика”, “ИФЖ”, “Известия вузов. Энергетика”, “Известия АН СССР. Энергетика и транспорт”, “Промышленная теплотехника”, “Труды МЭИ”, “Труды ЦКТИ”. Многочисленные работы авторов [2–15], опубликованные в ТВТ в этот период, посвящены анализу микрохарактеристик кипения, динамике процессов парообразования при варьировании определяющих режимных параметров (приведенное давление, недогрев жидкости, ориентация и ускорение системы, шероховатость поверхности нагрева, размеры и форма нагревателя и т.д.) в широких диапазонах при кипении различных жидкостей. Результаты вышеуказанных исследований впоследствии были обобщены в монографиях авторов [16–22], статьи которых ранее были широко представлены на страницах ТВТ.

Нельзя не упомянуть известные статьи [23–25], направленные на теоретическое изучение кинетики процессов испарения, чьи особенности важны при описании высокоинтенсивных фазовых переходов, ярким примером которых является кипение при определенных режимных параметрах. В работе [23] автором при изучении испарения — конденсации в системе из двух межфазных поверхностей при произвольных коэффициентах конденсации — рассмотрен метод “двухпоточной” функции распределения. Показано, что для однозначного решения задачи необходимо располагать сведениями о характере отражения молекул. В работе дано решение при малых температурных напорах для симметричных краевых условий при диффузном и зеркальном отражениях и различных числах Кнудсена системы. Установлено, что при неодинаковых значениях коэффициентов конденсации (несимметричные краевые условия) пар в объеме не является насыщенным. В конечном итоге отмечено, что рассмотренная в данной работе схема испарения—конденсации в ряде случаев может служить моделью реальных систем, в которых протекают процессы парообразования и

конденсации, а результаты этого важного исследования должны учитываться при анализе процессов в таких системах. В последующей работе авторов [24], также опубликованной в ТВТ, теоретически рассмотрено стационарное испарение (рост) сферической частицы, находящейся в собственном паре, при произвольных значениях числа Кнудсена и коэффициента испарения. Анализ проводился на основе кинетических уравнений БГК-модели и S-модели, учитывалось изменение температуры частицы в процессе испарения. В более поздней работе авторов [25] проведен кинетический анализ интенсивного испарения, основанный на “методе балансов обратных молекулярных потоков”. Предложен способ “коррекции сдвига скорости” при моделировании функции распределения падающих на границу молекул. Авторы получили аналитические решения системы уравнений баланса массы, импульса и энергии, определяющие макроскопические параметры процесса испарения. Показано, что результаты решений хорошо согласуются с результатами численного моделирования интенсивного испарения методом Монте-Карло.

В работе [26] рассмотрены две модели процесса, соответствующие кипению различных жидкостей, в том числе металлов при разных поверхностных условиях. Авторы показали, что, когда общие условия активации центров парообразования для металлов и обычных жидкостей идентичны (модель авторов № 1), теплообмен кипящего металла имеет высокую интенсивность. По мере уменьшения приведенного давления процессы парообразования на поверхности нагрева затрудняются. Анализ кипения металла для предельно затрудненных условий парообразования (модель авторов № 2) позволил оценить минимальные уровни теплоотдачи. С этих позиций авторами [26] выполнен детальный обзор существующих на то время экспериментальных данных. В [27] отмечено, что традиционно кривая кипения насыщенной жидкости изображается в виде кривой, включающей в себя следующие режимы теплосъема: теплосъем конвекцией при небольших перегревах жидкости на теплоотдающей поверхности и теплосъем при пузырьковом, переходном и пленочном кипении. Однако, как следует из анализа авторов [27], в этих условиях возможны еще два режима теплосъема: теплосъем конвекцией при значительных перегревах жидкости на теплоотдающей поверхности и теплосъем при неустойчивом кипении. Рассмотрена возможность перехода от одного режима теплосъема к другому при условии $q = \text{const}$ и $\Delta T = \text{const}$. В частности, переход к пленочному кипению при условии $q = \text{const}$ возможен из режима неустойчивого кипения и конвекции, а не только из режима пузырькового кипения. Вследствие данного направления исследований по прямому переходу режима свободной конвекции к пленочному режиму кипения было всесторонне изучено в рабо-

тах сибирских ученых в ИТ СО РАН и УрО РАН, включая как режимы вскипания жидкости на обедненных центрами парообразования поверхностях при низких приведенных давлениях, так и кризисные режимы вскипания жидкости с распространением самоподдерживающихся фронтов испарения в нестационарных по тепловыделению условиях (работы Б.П. Авксентюка с соавторами, Павленко А.Н. с соавторами, Павлова П.А. с соавторами).

Далее безусловно следует рассмотреть значительный цикл работ, представленных в ТВТ, по разработке модельных подходов к описанию коэффициента теплоотдачи и величины критического теплового потока при пузырьковом кипении и разработке соответствующих расчетных зависимостей. Большой объем взаимосвязанных экспериментальных исследований выполнен по изучению влияния толщины и температуропроводности теплоотдающей стенки на эффективность теплообмена при пузырьковом кипении и критическую плотность теплового потока [28–34]. Изучены эффекты микрогравитации и влияние значительных массовых сил во вращающихся системах и при ускорении [35, 36]. Кстати, работа авторов [36] опубликована в первом вышедшем в печать номере ТВТ. Специалистам по кипению хорошо известны монография С.С. Кутателадзе [37] и работа [38], в которых были представлены ставшие уже классическими и признанными в мире подходы к описанию величины критического теплового потока и коэффициентов теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости в условиях свободной конвекции. Результаты дальнейшего развития исследований по моделированию процессов теплообмена и описания величины критического теплового потока для различных диапазонов изменения приведенного давления в данных условиях и их детального анализа представлены в обобщающих работах [39–41]. Здесь уместно упомянуть недавно развернувшуюся дискуссию на страницах журнала “Теплоэнергетика” в работах [42–46] по описанию механизмов наступления и развития кризиса пузырькового кипения, которая несомненно вызовет большой интерес и у читателей журнала ТВТ. С учетом динамичного развития исследований в данной области такие тематические дискуссии и обзоры по актуальным вопросам физики кипения и разработки методов интенсификации теплообмена при кипении без сомнения целесообразны и полезны для ученых – читателей, в том числе журнала “Теплофизика высоких температур”.

Следующий цикл исследований, результаты которых широко представлены в журнале ТВТ, связан с описанием такого сложного явления, как кризис теплоотдачи при кипении в условиях вынужденного течения. Соотношения, полученные в [47] на основе модельных представлений, позволили с необходимой для практики точностью

проводить расчет критической плотности теплового потока как недогретых, так и насыщенных жидкостей в режиме пузырькового кипения в широком диапазоне изменения давления и массовой скорости потока. Успехи в изучении механизма кризиса теплоотдачи в дисперсно-кольцевом режиме течения, когда массовые паросодержания достаточно высоки, были на то время не столь очевидны. Это связано, прежде всего, со сложнейшими процессами влагообмена между дисперсным ядром потока и волнообразной, кипящей или гладкой (в зависимости от режимных параметров) пленкой жидкости на стенке, сопровождающими наступление кризиса. В работе [48] рассмотрены существующие модели кризиса теплоотдачи при кипении недогретой жидкости. На основе сопоставления этих моделей с экспериментальными данными автором данной работы сделано заключение “о бесперспективности попыток отыскания единой модели кризиса для всего исследованного диапазона недогревов. Это связано с принципиальными отличиями в режимах течения парожидкостной смеси при различных недогревах...”. Обобщение результатов исследований в данном направлении читатель может найти в учебном пособии для вузов “Механика двухфазных систем” [49]. В дальнейшем автором опубликованной в ТВТ работы [50] предложена упрощенная модель кризиса теплоотдачи при вынужденном течении воды в трубах. Проверка полученной зависимости для критического теплового потока показала, что эта формула с одним эмпирическим коэффициентом удовлетворительно обобщает 4745 экспериментальных значений критических тепловых потоков в широких диапазонах изменения режимных параметров. Систематические экспериментальные исследования [51–56], впоследствии представленные в ТВТ, были направлены на изучение влияния эффектов растворенного газа на процессы кипения и развитие кризисных явлений при вынужденном течении жидкости, в том числе недогретой, в каналах [51–55], на описание кризиса теплообмена при кипении в недогретом закрученном потоке в условиях одностороннего нагрева [56]. В недавно опубликованной в ТВТ работе [57] проведен обзор экспериментальных исследований характеристик теплообмена наножидкостей при кипении двухфазного потока в мини- и микроканалах. В настоящем обзоре основная причина противоречий, отраженных в литературе по экспериментальным измерениям коэффициента теплообмена при кипении, обусловлена различными закономерностями осаждения наночастиц разного размера на поверхности кипения и последующими изменениями морфологии и характера кипения. В работе определены ключевые параметры наножидкостей при кипении потока в мини- и микроканалах, и всесторонне рассмотрено влияние этих параметров на характеристики теплообмена при кипении. Авто-

ром [57] сделан ряд предложений для будущих экспериментальных исследований кипения наножидкостей с целью сведения к минимуму существующих противоречивых выводов в данной области.

Предметом цикла исследований [58–67] являются переходные процессы, возникающие при смене режимов кипения. В работах [58, 68], где исследовался переход от пленочного кипения к пузырьковому, впервые была сформулирована проблема устойчивости границы смены пузырькового и пленочного режимов кипения. В [68] экспериментально было установлено, что при так называемом равновесном тепловом потоке $q_{\text{рав}}$ граница между пузырьковым и пленочным режимами может быть неподвижной и режимы могут длительное время сосуществовать на поверхности стержня. В случае отклонения теплового потока от $q_{\text{рав}}$ в сторону больших значений начинается распространение пленочного режима. Пленочный режим занимает всю поверхность стержня. Отклонение q от $q_{\text{рав}}$ в сторону уменьшения приводит к распространению по всей поверхности стержня пузырькового режима. Таким образом, равновесный тепловой поток характеризует устойчивость зон пузырькового и пленочного режимов кипения. Зона тепловых потоков ($q_{\text{рав}} - q_{\text{кр.1}}$) является зоной метастабильного пузырькового режима, а зона ($q_{\text{кр.2}} - q_{\text{рав}}$) — зоной метастабильного пленочного кипения. Проведенные измерения показали, что, например, при кипении воды в интервале давлений 0.1–10 МПа имеет место отношение $q_{\text{кр.1}}/q_{\text{рав}} = 4-6$. В [58] величина $q_{\text{рав}}$ определена также теоретически. Понятие равновесного теплового потока имеет важное практическое значение для различных приложений, так как, выбрав расчетный тепловой поток, меньший $q_{\text{рав}}$, можно не опасаться перехода к пленочному кипению при любых отклонениях (в том числе нестационарных) режимных параметров от номинального значения. В настоящее время понятие равновесного теплового потока широко используется при описании тепловой устойчивости локальных очагов пленочного кипения на теплоотдающих поверхностях с неравномерными распределениями плотности теплового потока или коэффициента теплоотдачи, включая режимы нестационарного тепловыделения, при описании тепловых режимов сверхпроводников. Особенности динамики развития и тепловой устойчивости локальных очагов пленочного кипения при различных граничных условиях во фронте смены режимов кипения и в том числе с учетом нестационарного характера теплообмена в различных зонах фронта детально исследованы экспериментально, теоретически, а затем и в рамках численного моделирования в работах [60–67, 69] и ряде работ автора [70].

Важной частью исследований в области кипения, результаты которых также широко представлены в журнале ТВТ, являются статьи [71–82],

направленные на изучение процессов вскипания жидкостей на твердой поверхности нагрева в различных по тепловыделению условиям. Значимость этих исследований определяется широким использованием результатов по кинетике зародышеобразования при решении целого ряда задач, в частности, при описании переходных процессов и кризисных явлений при кипении в условиях нестационарного тепловыделения на поверхности нагрева, значительных пульсаций, падения давления в рабочих объемах и т.д. Результаты исследований в данной области на соответствующих этапах их развития были обобщены представителями уральской школы теплофизиков в хорошо известных специалистам монографиях [83, 84]. Авторами работ [79–81] экспериментально исследован процесс образования и роста паровых пузырьков до момента их слияния в паровую полость с учетом реальной шероховатости поверхности и зависимости времени активации соответствующих центров парообразования от температуры поверхности в условиях импульсного тепловыделения в стенке нагревателя. В рамках моделирования данных переходных процессов использована микрослоевая модель с учетом образования “сухих” пятен под паровыми пузырями. Решена также взаимосвязанная задача о формировании волны давления в кольцевом канале вследствие взрывного вскипания перегретого микрослоя под пузырьками. Полученные авторами [79–81] результаты позволили описать ряд экспериментальных данных и провести исследование нестационарных волновых процессов при вскипании недогретых жидкостей в присутствии зернистого слоя. В [82] представлены результаты экспериментального исследования динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения в условиях большого объема после образования первого парового пузыря при нестационарном тепловыделении на поверхности нагревателя. Исследования проводились с использованием фреона-R21, а также фреона-R21 с добавлением наночастиц. Проведение экспериментов в данной постановке позволило авторам [82] впервые показать влияние наночастиц непосредственно на интенсивность процессов испарения при различных массовых потоках на межфазной поверхности жидкость–пар, исключив трудно контролируемые эффекты взаимодействия наночастиц и их конгломератов с твердой поверхностью в процессе кипения (известные факторы осаждения наночастиц на твердую поверхность и образование устойчивых капиллярно-пористых покрытий). Получены экспериментальные данные по скорости распространения и структуре фронтов испарения, проведен спектральный анализ колебаний межфазной границы фронта испарения, определены характерные частоты и амплитуды колебаний межфазной границы в зависимости от температурного напора. В исследовании [82] показано, что добавление наночастиц существенно влияет на

температуру инициации фронта испарения, скорость фронта и характер колебаний межфазной границы. В конечном итоге полученные результаты проанализированы с позиции развития гидродинамической неустойчивости на межфазной поверхности жидкость–пар в постановке Ландау.

Цикл исследований по акустике кипения представлен в публикациях ТВТ [85–91], результаты которых позднее обобщены в монографии [21]. Анализ вышеуказанных и других многочисленных экспериментальных исследований в этой области позволил обнаружить и изучить наличие корреляции между тепловыми параметрами и характеристиками звукового сопровождения при кипении, что является основой пассивной акустической диагностики теплообмена в кипящей жидкости. Такая диагностика применяется, например, и сегодня с целью обнаружения и контроля отклонений от нормального режима работы целого ряда устройств энергетического оборудования.

Использование предельных и критических тепловых нагрузок в элементах энергетического оборудования требует диагностики процессов теплопереноса, опирающихся на объективные количественные показатели возникновения кризиса кипения. Теоретические и экспериментальные исследования представителей уральской школы в публикациях ТВТ [92–95] направлены именно на решение указанной выше научно-технической проблемы. В [94] с использованием принципа максимума энтропии исследована устойчивость случайных процессов с $1/f$ -спектром мощности в системе двух нелинейных стохастических дифференциальных уравнений, моделирующих пульсации в кризисных и переходных режимах теплообмена с интенсивными фазовыми превращениями. Проведен анализ устойчивости результирующего процесса, который возникает при взаимодействии случайного процесса с $1/f$ -спектром и внешнего детерминированного воздействия. При воздействии “гармонической силы” (по терминологии авторов) устойчивые результирующие процессы разделены на две ветви в зависимости от амплитуды гармонической силы. В [94] показано, что результаты проведенного экспериментального исследования влияния гармонического воздействия на устойчивость пульсаций с $1/f$ -спектром при кризисе кипения воды на нагретой протяженной поверхности качественно согласуются с теоретическими результатами. Здесь важно еще раз отметить, что установление общих закономерностей возникновения и устойчивости высокоэнергетичных пульсаций с низкочастотной расходимостью спектров мощности необходимо для разработки способов их подавления в важных технологических процессах, в частности в переходных процессах теплообмена в элементах энергетического оборудования с участием жидкого теплоносителя при больших тепловых нагрузках.

Значительное место в публикациях ТВТ занимает рассмотрение вопросов вскипания объемно перегретой жидкости и истечения глубоко метастабильной жидкости из каналов и отверстий различной формы. Эти исследования представлены работами [96–108]. Уже в первых публикациях в ТВТ авторами [96] было введено понятие скачка вскипания, представляющего собой зону интенсивного объемного вскипания, отделяющую набегающий поток перегретой метастабильной жидкости от расположенной ниже по потоку области равновесного течения. В работе утверждается, что скачок вскипания является ударной волной разрежения. Исследован вид и найдены характеристики ударной адиабаты вскипания в координатах давление–удельный объем, а также проведен анализ устойчивости скачка вскипания. Дана сводка возможных ударных явлений в средах, допускающих фазовые переходы. В последующих статьях авторов [97, 98] на основании концепции скачка вскипания разработана модель истечения насыщенной или недогретой жидкости с термодинамическими параметрами, достигающими критической точки, из диафрагм и коротких сопел. Выявлены три характерных режима истечения: гидравлический, режим с образованием скачка вскипания и режим с радиальным расширением потока. Показано, что если начальные параметры жидкости низки, то реализуется гидравлический режим истечения. При достижении вблизи выходного среза спинодального перегрева на малом расстоянии, равном толщине зоны вскипания, происходит расширение проходного сечения струек тока на конечную величину, что приводит к интенсивному разлету струи в радиальном направлении. При перегревах, близких к термодинамической критической точке, внутри канала формируется скачок вскипания. Авторами проведен анализ механизма запираания потока, а также даны рекомендации по расчету критического расхода вскипающей жидкости. Показано, что предлагаемый подход позволяет объяснить наблюдающуюся в экспериментах картину падения давления и создает основу для построения теории процесса нестационарного истечения вскипающей жидкости. В более новой работе [106] исследована устойчивость скачков вскипания, формирующихся при достижении в потоке предельных (околоспинодальных) перегревов. Показано, что в этих условиях возникновение скачка вскипания всегда сопровождается появлением специфических для данного класса задач колебаний. Проведен физический анализ механизма возникновения подобных колебаний, а также получены оценки величины пульсаций реактивного усилия истекающей среды, удовлетворительно согласующиеся с экспериментом. Сделан вывод о том, что наблюдаемый в рассматриваемых условиях механизм распада струи для целого ряда технических приложений может представлять собой эффек-

тивный способ распыливания струй жидкого топлива, сочетающий несколько одновременно действующих физических эффектов.

В [107] в рамках данного направления представлены результаты экспериментального исследования динамики вскипания струи перегретой воды, истекающей из камеры высокого давления через короткий канал квадратного сечения в атмосфере. Прослежено изменение формы струи при различных степенях перегрева. Установлен эффект полного развала струи – конус с развернутым углом раскрытия. При определенной температуре обнаружена потеря устойчивости полного раскрытия струи. Для различных режимов вскипания в безразмерных координатах получена зависимость изменения угла раскрытия струи от степени перегрева рабочей жидкости. В [108] выполнено опирающееся на ранее проведенные экспериментальные исследования численное моделирование процесса критического истечения парожидкостного потока в каналах цилиндрической формы, заполненных слоем шаровых частиц. Процесс характеризуется резким вскипанием жидкости и изменением теплогидравлических свойств потока. Изучено влияние материала и температуры заправки на интенсификацию парообразования и профили паросодержания по сечению канала. Получены данные по критическому расходу, скорости звука для различных конфигураций системы в зависимости от диаметра частиц, длины слоя шаровых частиц, их материала и уровня начального паросодержания. Выполнена оценка скорости звука при газодинамическом заперении парожидкостного потока, значения которой находятся в области между термодинамически равновесной и замороженной скоростями звука. Несомненный интерес здесь представляют и результаты работы [105], в которой изучено распространение малых возмущений в перегретой жидкости, содержащей газовые зародыши. На основе полученного дисперсионного уравнения исследовано влияние величин температуры, концентрации зародышей на скорость распространения и коэффициент затухания возмущения.

Исследования же, непосредственно связанные с описанием динамики роста отдельных паровых образований в объеме метастабильной жидкости, представлены в ТВТ работами [99–104]. В [99] впервые получено универсальное аналитическое решение задачи о контролируемом подводе тепла росте парового пузыря в большом объеме равномерно перегретой жидкости. Выведенная итоговая формула обеспечивает необходимые предельные переходы и хорошо согласуется с численными результатами Скрайвена для всего возможного диапазона изменения определяющих параметров. Показано, что радиальный поток жидкости интенсифицирует теплоподвод к межфазной поверхности, что приводит к увеличению скорости роста пузыря. На основании проведенного ана-

лиза сделан вывод о том, что ни одно из ранее известных частных решений не может корректно описать зависимость модуля роста парового пузыря от числа Якоба и отношения плотностей фаз. В [100] разработана обобщенная инерционно-тепловая схема роста парового пузыря в неограниченном объеме перегретой жидкости. Получено приближенное аналитическое решение, обеспечивающее предельный переход в асимптотиках по всем определяющим параметрам задачи. Здесь важно также отметить, что авторами данного исследования впервые получено физически корректное описание имеющихся «парадоксальных» экспериментальных результатов по росту паровых пузырей в околоспинодальной области.

В [103] проведен детальный исторический обзор теоретических работ, посвященных динамике роста паровых пузырей в объеме метастабильной жидкости. Получены и систематически исследованы асимптотические решения. Приведены результаты полного аналитического решения задачи, а также формулы для расчета скорости роста пузырей во всей области возможных изменений режимных параметров. В [104] проведено расчетно-аналитическое исследование начального периода роста парового пузыря околоспинодального размера. Сделан вывод о том, что динамический инерционный закон роста пузыря по Рэлею представляет собой асимптотическую ветвь решения, применимую при достаточно больших временах роста. Показано, что как на начальном этапе роста пузыря, так и при больших временах роста влияние сил вязкости вырождается и может заметно влиять на динамику роста пузыря лишь на промежуточных стадиях роста. Автором отмечено, что максимально влияние вязкости проявляется в области околоспинодальных перегревов даже для относительно маловязких жидкостей.

Перейдем к краткому анализу публикаций в журнале ТВТ, посвященных разработке методов интенсификации теплообмена при кипении. Сегодня существует довольно широкий перечень активных (вынужденное течение насыщенной жидкости; вынужденное течение недогретой до температуры насыщения жидкости в каналах со вставками сложной геометрии; спрейное и струйное орошения; пленочные течения при высоких расходных характеристиках жидкости или спутного газа; перемешивание, вращение; внешние поля: магнитогидродинамические, электродинамические методы и др.) и пассивных методов, активных/пассивных методов увеличения коэффициента теплоотдачи и повышения критического теплового потока при кипении. Пассивные методы, связанные с модификацией теплоотдающей поверхности, включают механическую обработку поверхностей (оребрение и микрооребрение, поверхности типа Thermexcel, Gewa и др.; метод микродеформирующего резания); создание капиллярно-пористых покрытий, в том числе микроструктури-

рованных (спекание порошков различных металлов, 3D-печать, плазменное напыление и др.); нанесение металловолоконистых структур; метод электроосаждения; сетчатые конструкции; нанесение покрытий методом литографии; микродуговое оксидирование теплоотдающей поверхности; методы газотермического напыления покрытий; обработка поверхности методом лазерной абляции совместно с химическими методами, в частности с созданием бифильных поверхностей, поверхностей с контрастной смачиваемостью; использование комплексных методов создания покрытий со сложной иерархической структурой и т.д. Такое многообразие различных способов микроstructuring теплоотдающей поверхности в значительной степени определяется в последнее время успехами в области материаловедения, современных нанотехнологий, развитием аддитивных технологий. Успехи в разработке высокоэффективных методов интенсификации теплообмена при кипении в различных гидродинамических условиях широко освещаются в последние годы в многочисленных обзорах отечественных и зарубежных ученых (обзоры за последние пять лет, например, представлены в [109–137]).

Инженерные поверхности можно классифицировать на основе: 1) интенсификации теплообмена (КТО); 2) повышения критического теплового потока (КТП); 3) одновременного повышения КТО и КТП.

Использование сложных (комбинированных) методов необходимо для изготовления поверхностей типа 3, хотя это является существенно более сложным процессом конструирования и изготовления. КТО при кипении может быть повышен за счет увеличения плотности мест зарождения, высокой пористости или изменения теплопроводности материала стенки/покрытия, увеличения объема захвата, легкости отрыва пузырьков и сокращения времени пребывания пара, лучшего контакта жидкость–стенка (удаление сухих пятен, вызванных растущими пузырями). КТП может быть увеличен путем разделения путей движения жидкости/пара, снижения сопротивления потоку, прерывания коалесценции пузырьков (подавление грибовидных пузырьков и образования регулярных паровых столбов), повышения смачиваемости (усиленное, быстрое повторное смачивание), повышения капиллярной способности покрытий (фитиля), устойчивого пополнения (подтока) жидкости (более быстрого и облегченного), модуляции длины волны неустойчивости, предотвращения ранней конденсации (деактивации) зародышей пара, учета фактора взаимодействия между зародышевыми полостями, повышенное перемешивание пограничного слоя, улучшение условий закрепления контактных линий.

Очевидно, что инженерные поверхности (микро- и наноструктурирование теплоотдающей поверхности) для процесса пузырькового кипения

должны быть весьма тщательно спроектированы, чтобы избежать деградации теплообмена и снижения КТП при варьировании режимных параметров конкретной жидкости и параметров стенки. Например, должны быть обеспечены оптимальные размеры частиц и пористость композитных микроstructuringированных капиллярно-пористых покрытий, чтобы уменьшить сопротивление пузырьковому кипению, увеличить эффективную площадь поверхности, транспортные параметры подтока жидкости и отвода пара (КТО либо КТП).

В обзоре [135] представлен анализ современных исследований по интенсификации теплообмена (включая подробное рассмотрение российских исследований, зачастую не представленных в зарубежных обзорных работах) с использованием передовых пассивных и активно-пассивных методов интенсификации. Рассматриваются исследования по интенсификации кипения и испарения с использованием коммерческих поверхностей, а также перспективные разработки, полученные различными способами модификации: как механическими (деформирующее резание, применение сеточных покрытий и т.д.), так и более ресурсоемкими современными методами и их комбинациями, применяемыми при создании мультимасштабных, бифильных и прочих микро- и наноструктурированных поверхностей и покрытий. Показано, что известные механические способы обработки и новейшие методы структурирования поверхностей позволяют достигать значительных результатов по интенсификации теплообмена. В первую очередь уделяется внимание исследованиям с применением относительно простых и доступных в реализации методов модификации поверхностей, обладающих потенциалом для применения в современном теплообменном оборудовании уже сегодня. В настоящее время хорошо известно, что оребрение теплоотдающей поверхности является одним из эффективных способов увеличения коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока при кипении. Первые исследования, опубликованные в ТВТ и связанные с разработкой данного метода, представлены работами [138–140]. В [138] предложен метод расчета и проведен расчет теплопередачи через одиночное ребро, омываемое кипящей жидкостью в условиях свободной конвекции. Отличительная особенность процесса кипения на оребренной поверхности заключается в том, что парообразование происходит на существенно неизотермической поверхности, в связи с чем в определенном диапазоне изменения тепловых потоков на поверхности ребра могут одновременно существовать все три режима: пленочный, переходный и пузырьковый. В [139] разработана конструкция, позволяющая моделировать условия процесса кипения на стенке с горизонтальными плоскими ребрами. Проведено исследование механизма снабжения жидкостью межреберных за-

зоров, измерены местные тепловые потоки. Исследован теплообмен при кипении воды на десяти различных оребрениях. Предложена методика расчета теплообмена при кипении воды и фреона-113 на стенках с горизонтальными плоскими ребрами. В развитии данных исследований в [140] получены экспериментальные данные по теплообмену и критическим тепловым потокам при кипении хладонов на гладкой и оребренной вертикальных поверхностях в условиях свободной конвекции. Рассмотрено влияние на эти процессы ширины межреберного зазора. Показано, что в зависимости от безразмерного расстояния между ребрами максимальный тепловой поток, отводимый поверхностью, увеличивается более чем в два раза по сравнению с гладкой поверхностью. Интенсивность теплообмена на оребренной поверхности также выше, чем на гладкой, особенно в области малых тепловых потоков. Выявлено, что максимальное количество тепла отводится от поверхности при изменении безразмерного расстояния между ребрами в пределах $1.0 < \delta < 1.5$. Оребрение поверхности позволяет повысить значение критического теплового потока, если эффективность ребра для околоскритического теплового потока $E > 0.9$, пропорционально коэффициенту оребрения. В развитии [138] также отмечено, что необходимо различать два значения критических тепловых потоков. Первый из них соответствует возникновению пленочного кипения в межреберной впадине, а второй – развитому пленочному кипению на всей поверхности ребра. При значении q_{*1} наблюдаются изменение характера теплоотдачи и плавное изменение температуры стенки, а при q_{*2} имеет место резкое увеличение температуры стенки.

Исследования по интенсификации теплообмена при кипении с использованием капиллярно-пористых покрытий представлены в публикациях [141–153].

В работе [142] экспериментально исследован теплообмен при пузырьковом кипении жидкого азота и фреона-113 на поверхностях с пористыми медными и алюминиевыми покрытиями, полученными методами спекания и газотермического напыления. Изучено влияние геометрических параметров и вида покрытий на тепловые характеристики. Показано, что для спеченных поверхностей пористость носит “объемный” характер, в то время как для газотермических – “поверхностный”. Разная структура таких покрытий приводит к большим различиям в тепловых характеристиках. Процесс кипения значительно интенсифицируется за счет применения спеченных пористых покрытий; причем отмечено, что наиболее эффективно использование слоев толщиной ~ 0.2 мм из частиц размером 40–50 мкм. Целью последующей работы [143] являлось исследование теплообмена при кипении азота и фреона-113 при атмосферном

давлении на медных трубах с кольцевым оребрением, на поверхность которого нанесено металлопористое покрытие. Проведенное авторами сопоставление экспериментальных данных показало, что пористое покрытие значительно интенсифицирует теплообмен на оребренной трубе, особенно в области малых температурных напоров в основании ребер. В [143] сформулирован вывод о том, что применение оребренных поверхностей с пористым покрытием значительно уменьшает (по сравнению с поверхностью без покрытия) требуемые температурные напоры во всем диапазоне нагрузок, вплоть до критических. Отмечено, что такие поверхности с покрытием могут найти широкое применение в термосифонных системах охлаждения, силовых полупроводниковых приборах, конденсаторах-испарителях и других теплообменных аппаратах, где высокие тепловые нагрузки сочетаются с требованием малых температурных напоров. В одной из первых работ в данной области [141] изучались элементарные процессы, ответственные за обогащение нелетучими примесями жидкости в непосредственной близости к поверхности нагрева при кипении на поверхности, покрытой пористой структурой. В работе предложена простая теория, позволяющая рассчитать степень обогащения такими примесями жидкости на теплоотдающей поверхности. По представленным в данном исследовании результатам оказалось, что за счет изученных эффектов возможны обогащения в 10^2 – 10^3 раза, что может приводить к коррозии поверхности нагрева, если поверхностно-инактивные примеси являются коррозионноопасными. Как отметили авторы, возможно, что эти эффекты являлись причиной происшедших ранее аварий парогенераторов на ряде установок с реакторами PWR. С точки зрения анализа вопросов безопасности работы теплообменного оборудования, следует упомянуть и работы [154, 155], в которых представлены результаты экспериментального исследования критических тепловых потоков при кипении высококипящих органических теплоносителей (дифенил, моноизопротилдифенил, дифенилоксид, даутерм, бензол) на погруженных поверхностях различной геометрии и материалов и изучено влияние термического разложения органических теплоносителей на теплообмен при кипении в большом объеме.

Авторами [149] исследованы зависимости критических тепловых нагрузок и основных характеристик элементарных процессов при кипении в большом объеме на поверхностях с нетеплопроводными пористыми покрытиями от характеристик покрытий. Экспериментально установлена неадекватность гидродинамических моделей кризиса кипения, основанных на анализе устойчивости двухфазного пограничного слоя вблизи внешней границы покрытия, для поверхностей с низкотеплопроводными пористыми покрытиями. В [150] приводятся результаты исследова-

дований механизма возникновения и развития кризиса кипения на поверхности с пористыми покрытиями методом термограмм. Обосновывается перколяционная природа кризиса кипения в этих условиях. В данной работе приводятся результаты исследований механизма возникновения и развития кризиса кипения на поверхностях с нетеплопроводными пористыми покрытиями. Отмечено, что рассмотренные выше особенности термограмм развития кризиса полностью определяются гидродинамическими процессами в пористых покрытиях и роль процессов переноса тепла по подложке незначительна. В [156] исследовались термограммы развития кризиса кипения азота на гладких массивных медных подложках и обнаружен эффект замедления развития кризиса с ростом толщины подложки. В экспериментах [150] использовались нихромовые подложки толщиной, практически на порядок меньшей, чем в [156], а временные задержки в развитии кризиса оказались на 1–2 порядка больше, чем в [156], что подтверждает определяющую роль процессов протекания в пористых покрытиях в обнаруженных авторами эффектах. Понятно, что термограммы развития кризиса на массивных высокотеплопроводных поверхностях с пористыми покрытиями могут существенно отличаться от полученных выше в связи с возрастанием вклада процессов переноса тепла по подложкам. Опираясь на имеющиеся теоретические разработки, авторы [151] предприняли попытку разработать методику численного расчета коэффициента теплоотдачи. Получено удовлетворительное согласование расчетных значений с экспериментальными. Расчетно-теоретическое исследование позволило по мнению авторов “заглянуть” внутрь пористой структуры и проследить, как изменяются основные характеристики процесса парообразования по толщине пористого слоя при различных тепловых потоках.

Интересные результаты экспериментального исследования кризиса высыхания при подъемном течении пароводяного дисперсно-кольцевого потока в трубах с пористыми покрытиями представлены в [152]. Здесь определена область режимных параметров, при которых наличие пористых покрытий приводит к затягиванию развития кризиса и обеспечивает возможность бескризисной работы парогенерирующих каналов вплоть до паросодержаний, близких к единице. Обсуждаются изменения механизмов влагообмена между ядром потока и пристенной пленкой жидкости, связанные с наличием пористых покрытий, из которых главную роль играют: изменение диапазона размеров капель в потоке, наличие заметной доли “прострельных” капель, расширение области влияния пузырькового влагоуноса вплоть до граничных паросодержаний, капиллярные эффекты в теле покрытий и интенсификация повторного смачивания в области кризиса осушения. В обзорной работе [157] 1992 г. рассмотрены перспек-

тивные методы интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении, проанализирован механизм парообразования на поверхностях с интенсификаторами теплообмена и даны обобщенные соотношения для расчета теплоотдачи. На основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных для различных капиллярно-пористых покрытий (High Flux, Thermoexcel, испарительные структуры, работающие по принципу перевернутого мениска), ребристых поверхностей Gewa-T продемонстрированы возможности каждого из рассматриваемых методов интенсификации теплообмена при кипении.

Работы [158, 159] направлены на разработку методов интенсификации теплообмена при кипении и испарении при пленочных течениях жидкости, которые широко применяются в разнообразных технологических приложениях: пленочных теплообменниках, конденсаторах, испарителях различного назначения, выпарных аппаратах, в криогенном оборудовании, в том числе для охлаждения тепловыделяющих поверхностей в спиральных теплообменниках для ожижения природного газа и т.д. В исследовании [158] показано, что изменение структуры волновой поверхности на поперечно оребренной трубе, наблюдаемое при увеличении плотности орошения, приводит к росту коэффициента теплоотдачи в режиме испарения по сравнению с результатами для гладкой поверхности и поверхности с трехмерным микрооребрением. Проведено сравнение экспериментальных данных по критическому тепловому потоку на гладкой и текстурированных поверхностях. Выявлено, что критический тепловой поток для трехмерной текстуры в диапазоне пленочного числа Рейнольдса $Re = 100–400$ возрастает по сравнению с гладкой и поперечно оребренными поверхностями. Полученные данные по условиям образования устойчивых сухих пятен в режиме пузырькового кипения в исследованном диапазоне изменения числа Рейнольдса удовлетворительно описываются расчетом по модели испарения остаточного слоя, предложенным в [70]. В [159] представлены результаты трехмерного численного моделирования динамики стекания пленки жидкости по вертикальным поверхностям при варьировании контактного угла смачивания в широком диапазоне его изменения при различных числах Рейнольдса. Моделирование проводилось с применением метода объема жидкости (VOF) в пакете OpenFOAM. В данной работе показано, что в адиабатических условиях величина контактного угла смачивания главным образом определяет реализацию и динамику развития различных режимов течения ламинарной и ламинарно-волновой пленки жидкости: сплошная пленка, устойчивый струйный режим, каскадный струйный режим, режим “массивной” струи, струйно-капельный режим и режим осушения. Анализ результатов показывает, что контактный угол смачивания оказывает ключевое влия-

ание на относительную долю смоченной поверхности при заданных значениях плотности орошения в области малых плотностей тепловых потоков, что принципиально важно учитывать при проведении расчетов общей эффективности теплообмена в теплообменниках указанного выше типа.

Исследования авторов [160, 161] направлены на разработку методов интенсификации теплообмена при испарении и кипении в горизонтальных слоях жидкости. Отвод тепла от тепловыделяющих поверхностей в тонких горизонтальных слоях жидкости широко используется в термосифонах, паровых камерах, тепловых трубах различного назначения [137]. В [160] проведен анализ экспериментальных данных по зависимости плотности теплового потока от температурного напора, по критическому тепловому потоку в широком диапазоне изменения высоты слоя жидкости. Показано, что величина критического теплового потока увеличивается в узком диапазоне изменения высоты слоя более чем на порядок. В последующей работе [161] представлено экспериментальное исследование теплообмена при кипении в тонком горизонтальном слое жидкости на микроструктурированных капиллярно-пористых покрытиях. Образцы различных покрытий были изготовлены с помощью аддитивной технологии 3D-печати методом селективного лазерного спекания. На покрытие, изготовленном из менее теплопроводного материала (нержавеющая сталь), наблюдалась инверсия кривой кипения, которая привела к пятикратному снижению температурного напора по сравнению с поверхностью без покрытия. Показано, что инверсия кривой кипения на приработанном в течение длительного времени покрытии начиналась при меньшей в семь раз плотности теплового потока.

Интересные результаты представлены в [162], где выполнено экспериментальное исследование характеристик процесса и теплоотдачи при кипении воды, существенно недогретой до температуры насыщения, на мезоструктурированных поверхностях, полученных методом микродугового оксидирования (МДО) титановой фольги с образованием слоя TiO_2 и осаждением частиц Al_2O_3 из кипящей наножидкости. Эксперименты были проведены при вынужденном течении деаэрированной воды в вертикальном прямоугольном канале. Применение покрытия, образованного методом микродугового оксидирования, интенсифицировало теплоотдачу на 20–30%. Анализ полученных экспериментальных данных по характеристикам кипения недогретой воды в условиях вынужденного течения на поверхностях, сформированных методом МДО и осаждением наночастиц Al_2O_3 из кипящей наножидкости, показывает, что в исследованном диапазоне режимных параметров такие характеристики процесса, как устойчивость центров кипения, хаотичность их распределения в пространстве, плотность центров на единицу площади

греющей поверхности, распределение пузырей по размерам, эволюция пузыря во времени, слабо зависят от типа структурированной поверхности и определяются прежде всего величиной недогрева жидкости до температуры насыщения. С известной осторожностью этот вывод, по мнению авторов, можно распространить на другие мезоструктурированные поверхности. Выводы, сформулированные в данном исследовании, косвенно указывают на необходимость проведения дальнейших исследований для определения наиболее приемлемых линейных масштабов микро- и наноструктурирования теплоотдающей поверхности при кипении жидкостей различных типов в условиях их глубокого недогрева до температуры насыщения для условий как большого объема, так и теплообмена в каналах и при спрейном/струйном орошениях. Очевидно, что резкое уменьшение характерных размеров ряда микрохарактеристик кипения, существенное изменение структуры двухфазного пристенного слоя в условиях глубокого недогрева жидкости определяет и соответствующее изменение морфологии модифицируемых теплоотдающих поверхностей для достижения максимальной интенсификации теплообмена при кипении в таких условиях. Анализ современной литературы показывает, что систематические исследования в данной области при кипении глубоко недогретых жидкостей на модифицированных поверхностях, направленные на решение вышеуказанной задачи, на сегодня весьма немногочисленны.

Не осталась обойденной на страницах ТВТ и тематика, связанная с описанием теплообмена и кризисных явлений при кипении в нестационарных режимах нагрева и охлаждения [163–181]. В [163] представлены результаты одного из первых в мире исследований по изучению условий наступления режимов ухудшенного теплообмена при ступенчатом набросе тепловой нагрузки на поверхности. Исследовались критические тепловые потоки при набросе мощности с нулевого уровня теплового потока и от начальных значений, соответствующих естественной конвекции и пузырьковому кипению. Обнаружены и объяснены два вида перехода к ухудшенному теплообмену: за счет спонтанного вскипания жидкости в перегретом пограничном слое и за счет слияния пузырей при пузырьковом кипении. В [164] изложены результаты исследования закономерностей возникновения кризиса теплоотдачи в условиях ударного тепловыделения на поверхностях нагрева, снабженных пористым сетчатым покрытием. Авторы пытались установить особенности протекания данного процесса. Отмечено, что плотно прижатая сетчатая структура дробит паровые образования на отдельные струи, тем самым препятствуя образованию сплошной паровой пленки. Это и является, по мнению авторов [164], одной из причин увеличения критической тепловой нагрузки при нестационарном тепловыделении.

Из анализа авторов также следует, что при наличии сетчатых покрытий характерные времена перехода к пленочному режиму кипения заметно увеличиваются. В работе [165] изучено явление формирования паровой пленки на нагревателе в режимах быстрого перегрева жидкости в пристенном слое при положительных и отрицательных давлениях. Предложены модель явления и методика расчета скорости фронта парообразования. Показано существенное влияние капиллярных сил на динамику формирования паровой пленки. Как отмечают авторы, при малой толщине перегретого слоя капиллярные силы компенсируют перепад давления между паром и жидкостью, и в результате распространение паровой пленки становится невозможным. В таких условиях покрытие нагревателя паром осуществляется по механизму флукуационного рождения пузырьков, их роста и слияния. Аналогичные процессы, по утверждению авторов [165], наблюдаются при паровом взрыве.

Авторами [166] впервые приведены результаты экспериментального исследования динамики развития теплообмена и кризисных явлений в стекающих пленках жидкости при нестационарном тепловыделении с поверхности нагревателя, построены карты последовательно развивающихся режимов теплообмена. В экспериментах исследованы переходные режимы с образованием сухих пятен и развитием кризиса осушения при ступенчатом и квазистационарном законах тепловыделения. Показано, что при малых значениях плотности теплового потока в кризисных режимах в условиях ступенчатого наброса распад ламинарно-волновой пленки жидкости происходит с возникновением метастабильных регулярных структур со струями жидкости и крупномасштабными несмоченными зонами между ними. При высоких плотностях теплового потока интенсивное вскипание жидкости приводит к быстрому выбросу жидкости в виде капель и полному осушению (практически одновременно) всей теплоотдающей поверхности. В работе получены экспериментальные данные по временам ожидания вскипания жидкости, развития регулярных структур и осушения теплоотдающей поверхности в зависимости от теплового потока в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса. Из анализа экспериментальных данных [166] следует, что при расчете времени ожидания вскипания жидкости при ступенчатом тепловыделении в исследованных диапазонах изменения теплового потока и степени орошения необходимо учитывать развитие интенсивного испарения со свободной поверхности ламинарно-волновой пленки. Результаты исследования обратных режимов охлаждения при повторном смачивании поверхности сильно перегретых вертикальных пластин стекающей пленкой жидкости представлены в работах [153, 167, 168]. Экспериментально показано влияние пленочного числа Рейнольдса, начальной температуры перегрева

стенки на скорость и пороговую температуру повторного смачивания. Экспериментальные данные авторов, полученные ранее, показали, что на тонкостенной фольге распространяющийся фронт повторного смачивания не является плоским и характеризуется ячеистой структурой с регулярными кипящими струями и межструйными зонами, где теплообмен в смоченной зоне происходит в режиме испарения. На основе сравнения экспериментальных данных показано, что значительное увеличение толщины охлаждаемой стенки приводит к вырождению ячеистой структуры и выравниванию фронта повторного смачивания. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами проводимого авторами численного моделирования процесса повторного смачивания. В последующих работах данного коллектива авторов представлены результаты экспериментального исследования повторного смачивания стекающей пленкой жидкости поверхности сильно перегретых вертикальных медных пластин с низкотеплопроводными покрытиями [168] и структурированными капиллярно-пористыми покрытиями, нанесенными методом направленного плазменного напыления [153]. Показано, что наличие обоих типов покрытия оказывает существенное влияние на характер температурных кривых и уменьшает полное время охлаждения пластин более чем в три–четыре раза. Анализ синхронизированных измерений распределения температуры вдоль пластин и высокоскоростной видеосъемки переходных процессов показал, что более высокий темп охлаждения при наличии исследованных авторами покрытий связан с развитием интенсивного кипения во фронте повторного смачивания при существенно более высокой температуре пластин и последующим быстрым возникновением и развитием зон переходного и пузырькового режимов кипения.

В большом цикле работ [169–179] представлены результаты охлаждения сильно перегретых тел при их быстром погружении в жидкость, как правило, в сильно недогретую до температуры насыщения воду. Интерес к этой проблеме в том числе связан с попытками осмысления такого явления, как паровой взрыв, где смена режимов кипения приводит к фрагментации и резкому увеличению поверхности расплава. Вероятность возникновения парового взрыва при контакте расплава корияма с недогретой водой, т.е. почти мгновенного вскипания большой массы жидкости, сопровождающегося резким ростом давления в системе, существенно ограничивает технические возможности по ликвидации тяжелой аварии на АЭС. Помимо атомной энергетики с паровым взрывом сталкиваются в металлургии, химической промышленности, при варке целлюлозы и в ряде других технологических процессов. В одной из первых таких работ [169] изучались процессы развития неустойчивости и разрушения паровой пленки на

твердой полусферической поверхности. При измерениях использовались волоконно-оптические датчики давления и толщины паровой пленки, проводилась видеосъемка процесса с последующей компьютерной обработкой изображений. В итоге авторами разработана физическая модель явления, учитывающая перегрев и взрывное вскипание воды во впадинах волнообразной паровой пленки. В [169] отмечено, что многофакторность процесса инициирования парового взрыва и недостаточная воспроизводимость процесса смены режимов кипения, связанная в основном со сложностью контроля в эксперименте состояния нагретой поверхности (наличие окислов, шероховатость), определяют актуальность продолжения исследований с целью детального изучения механизма данного явления. В последующей работе [170] также представлены результаты экспериментального исследования поведения паровой пленки на сильно перегретой полусферической поверхности, погруженной в недогретую до температуры насыщения воду. Выявлены условия существования паровых пленок на горячей поверхности, характеристики их схода с поверхности нагрева и перехода к пузырьковому кипению, а также эффекты, сопровождающие сход паровой пленки. Обсуждены возможности внутреннего триггеринга тонкой фрагментации горячего расплава и парового взрыва. Затем в [171] были представлены соотношения, позволяющие оценить размеры осколков жидкометаллической капли после ее фрагментации, образующейся при быстром контакте поверхности горячего металла и охладителя. На основе полученного экспериментального материала показано, что амплитуда импульсов давления, генерируемых при разрушении паровой пленки (второй кризис кипения), в несколько раз меньше значений, требуемых для инициирования спонтанного парового взрыва. Авторами [171] обосновано предположение, что прогресс в изучении процесса инициирования спонтанного парового взрыва связан в первую очередь с успехами в понимании механизма фрагментации отдельной капли. В [172] обсуждается важный для понимания и количественного описания сложной последовательности данных переходных процессов вопрос о возможности прямого контакта охлаждающей жидкости с перегретым телом, температура теплоотдающей поверхности которого значительно превышает температуру спиноподобного распада. В [174] при экспериментальном исследовании взаимодействия волн давления с паровой пленкой при пленочном кипении недогретой воды на поверхности твердых сфер было обнаружено изменение внешнего вида межфазной поверхности под действием таких волн. Авторы [175] представили результаты экспериментального исследования режимов теплообмена при охлаждении в воде нагретых до высокой температуры шаров из стали с технически гладкой и модифицированной по-

верхностями. Проведенная в данной работе модификация состояла в нанесении на поверхность тонкодисперсного углеродистого покрытия с последующей электронно-лучевой обработкой. При охлаждении в недогретой до температуры насыщения воде на обоих исследованных образцах возник режим интенсивного теплообмена при условно пленочном кипении с тепловыми потоками на поверхности до 6 МВт/м^2 . Здесь следует отметить, что значения теплового потока на основе исходных термограмм охлаждения получены решением одномерной обратной задачи теплопроводности. Углеродистое покрытие приводило в данных условиях охлаждения к снижению температуры поверхности, отвечающей переходу к интенсивному режиму охлаждения, тогда как сам режим интенсивного охлаждения был идентичен для образцов с разной обработкой поверхности. Экспериментальные результаты подтвердили предложенную авторами приближенную модель условий возникновения интенсивного режима охлаждения при пленочном кипении недогретой жидкости. Авторы отметили, что данная модель не учитывает влияния структуры покрытия на переход к интенсивному режиму охлаждения. Сделано предположение, что если масштаб выступов шероховатостей не превышает толщины паровой пленки, то влияние именно теплофизических свойств поверхности является более сильным фактором, влияющим на вероятность появления точечных контактов жидкости со стенкой. В последующей работе [176] авторы исследовали интенсивное охлаждение высокотемпературных тел в бинарной смеси вода–изопропанол. Сделан вывод о том, что доступные экспериментальные данные о закалке металлических тел в недогретой воде свидетельствуют о наличии режима чрезвычайно интенсивного охлаждения при температурах поверхности, превышающих температуру предельного перегрева жидкости. Отмечено, что в настоящее время нет не только теоретического, но и обоснованного качественного описания механизма, позволяющего отводить подобные тепловые потоки в режиме пленочного кипения. В экспериментах по охлаждению в криожидкостях, фторуглероде, этаноле и изопропаноле подобный режим не возникает даже при предельно высоких достигнутых недогревах. Этим, по утверждению авторов [176], обусловлена целесообразность проведения вышеуказанных экспериментов по охлаждению высокотемпературных образцов в бинарной смеси вода–изопропанол. В данном исследовании определена граничная концентрация изопропилового спирта в смеси, при которой возникает режим интенсивного охлаждения при пленочном кипении. В одной из последних работ этих авторов [177] представлены новые экспериментальные данные по охлаждению шаров из никеля и дюралюминия в недогретых воде и этаноле и обобщение комплексных экспериментальных исследований, про-

веденных с 2015 по 2022 гг. В конечном итоге изложена гипотеза о механизме дестабилизации паровой пленки при нестационарном охлаждении высокотемпературных тел, а также предложены новые соотношения для оценки температурного напора при прекращении пленочного кипения насыщенной и недогретой жидкости. Полученные уравнения проверены на большом массиве собственных экспериментальных данных, а также на данных других исследователей и продемонстрировали хорошее качественное и количественное согласие с экспериментом.

Здесь уместно отметить и ряд других публикаций в ТВТ [178–180] одного из авторов работ последнего раздела. Результаты работ [178, 179] представляют несомненный интерес для специалистов при разработке моделей описания процессов теплообмена при пленочном кипении жидкостей, в том числе существенно недогретых до температуры насыщения. В [178] теоретически исследована устойчивость (линейный и нелинейный анализ) границы раздела между тонкой паровой пленкой и слоем жидкости при наличии стационарного теплового потока, идущего от нагретой до высокой температуры металлической поверхности к пленке пара и далее от пара к недогретой до температуры кипения жидкости. Показано, что тепловые процессы на фазовой границе, возможные и в отсутствие силы тяжести, приводят к генерации слабозатухающих периодических волн малой амплитуды, скорость которых может намного превышать скорость гравитационных волн. Тепловой поток через поверхность раздела фаз может на этой поверхности возбуждать периодические волны малой длины (рябь), не являющиеся капиллярными. Процессы фазового перехода на границе могут обеспечить устойчивость паровой пленки под слоем жидкости в поле сил тяжести. Показано, что на нелинейной стадии, наряду с периодическими волнами и солитонами, из-за слабого изменения толщины пленки может возникнуть режим взрывной неустойчивости, когда амплитуда первоначально малой плоской волны возрастает до бесконечности за конечное время. В более поздней работе [179] данного автора исследован процесс пленочного кипения в системе пар–жидкость, находящейся в открытом сверху прямоугольном бассейне, одна из вертикальных стенок которого нагрета до температуры, превышающей температуру кипения жидкости. Методом многомасштабных асимптотических разложений были построены решения уравнений сплошной среды и найдена форма фазовой границы, разделяющей пар, примыкающий к горячей вертикальной стенке, и холодную жидкость. Найденное решение позволяет рассчитать характеристики теплообмена при пленочном кипении на вертикальной поверхности. Специалистам может быть интересен и предложенный ранее автором [180] способ статистического описа-

ния микрохарактеристик кипения, основанный на определении функции плотности вероятности отрывных радиусов паровых пузырей, заключающийся в применении принципа максимума информации, позаимствованного из области синергетики.

Нельзя не отметить в данном сообщении цикл работ [181–188] по изучению теплообмена при кипении различных эмульсий. Авторами данных работ рассматриваются преимущественно эмульсии, у которых капельки дисперсной фазы имеют температуру кипения ниже температуры кипения дисперсионной среды. В рамках экспериментального исследования явления взрывного вскипания перегретых капелек эмульсии показано, что цепная активация низкотемпературных центров кипения инициируется случайной активацией одного из них. Взрывное вскипание перегретой капельки эмульсии на низкотемпературном центре кипения способствует активации нескольких соседних центров кипения, что в свою очередь приводит к дальнейшей активации других центров кипения. Авторами предложен механизм цепного зародышеобразования в перегретых капелках эмульсии. При проведении исследований теплообмена при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой обнаружено существенное расширение температурного интервала режима пузырькового кипения эмульсий. Определены режимы теплообмена, при которых коэффициент теплоотдачи к эмульсии в 1.2–4 раза превышает значения, полученные для чистой дисперсионной среды. Показано, что путем введения в эмульсию поверхностно-активных веществ и адсорбентов можно управлять числом центров кипения, а следовательно, и интенсивностью теплоотдачи. В результате обобщения, проведенного авторами этих работ, отмечено, что результаты исследований теплообмена при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой могут являться основой для создания теплообменного оборудования с эмульсией в качестве рабочей жидкости.

В работах [189, 190] экспериментально исследовались особенности теплообмена и гидродинамики при кипении жидкости на поверхностях с различными типами неоднородностей в условиях воздействия внешних электрических полей. Наиболее простые конфигурации профиля теплоотдающей поверхности создавались путем фрезерования канавок различной геометрии с характерными размерами порядка 1–3 отрывных диаметров пузырей, т.е. микрооребрением поверхности. В данных экспериментах по кипению в поле и без поля с целью исключения влияния гистерезисных эффектов измерения проводились при обратном ходе, т.е. в режимах снижения тепловой нагрузки после достижения развитого кипения. Авторами показано, что наличие неоднородного поля вблизи обогреваемой поверхности может приводить к некоторой интенсификации теплообмена только на начальных участках кривых ки-

пения. Основным механизмом наблюдаемой не столь значительной интенсификации теплообмена, по мнению авторов, является образование “полевых ловушек” и вызванное этим эффектом существенное изменение гидродинамики двухфазных течений вблизи обогреваемой поверхности.

В рамках данного рассмотрения, конечно, необходимо отметить и работы [191–195], тематика которых непосредственно связана с разработкой и совершенствованием различных систем охлаждения, использующих высокоинтенсивные режимы кипения и испарения. В настоящее время в мировой литературе количество таких публикаций неуклонно растет, что обусловлено, в частности, все более возрастающими требованиями по критическим параметрам отвода плотностей тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи в микроэлектронике и силовой электронике [196]. В одной из первых работ [191] приведены результаты экспериментального исследования предельных плотностей теплового потока в низкотемпературных (главным образом водяных) тепловых трубах. Рассмотрены структуры, выполненные из металлических сеток с размером ячеек 0.04–1.8 мм, перфорированных экранов и медного войлока (всего 35 типов структур). Показано, что кризисные явления обусловлены потерей капиллярного напора (по терминологии авторов). Даны некоторые практические рекомендации по конструкции фитилей, устойчиво работающих при больших плотностях теплового потока. Проведенные эксперименты показали, что при использовании оптимальных в отношении теплосъема типов капиллярных структур в низкотемпературных тепловых трубах в зоне нагрева можно отводить плотности теплового потока, превышающие критические тепловые нагрузки при кипении на гладкой поверхности. Это обусловлено, по мнению авторов, сложной деформацией профиля мениска в порах таких структур, приводящей к образованию в центре мениска тонкой некипящей пленки жидкости, обладающей малым термическим сопротивлением. В [192] выполнено экспериментальное исследование испарителя тепловой трубы, работающего по принципу перевернутого мениска, с диаметром обогреваемой поверхности 100 мм. Показана возможность увеличения коэффициентов теплоотдачи до 10^6 Вт/(м² К) и тепловых потоков до 2×10^6 Вт/м². Выполнено теоретическое и численное исследование процессов в испарителе, предложен метод расчета теплообмена в испарителе, работающем по принципу перевернутого мениска. Сформулирован вывод о том, что такие испарители позволяют отводить тепловые потоки высокой плотности с очень большими коэффициентами теплоотдачи. В работах [193, 194] исследуются результаты испытаний по характеристикам контурных тепловых труб. Авторами [193] рассматривается задача стационарного тепломассопереноса в цилиндрическом испарителе

контурной тепловой трубы с тепловым интерфейсом, имеющим форму прямоугольного параллелепипеда, с источником тепла, расположенным на одной из его больших поверхностей. Проведено численное моделирование тепловых процессов в рассматриваемой системе при различных плотностях теплового потока. Получены данные о распределении температуры в испарителе и тепловом интерфейсе. Выполнен анализ температурной неоднородности на поверхности нагрева интерфейса и интенсивности испарения теплоносителя в пароотводные каналы испарителя. В [194] представлены результаты разработки и испытаний медь-водяных контурных тепловых труб с плоскоовальным и плоским дискообразным испарителями. Показано, что разработанные устройства могут эффективно использоваться в системах охлаждения объектов с греющей поверхностью до 30 см², рассеивающих до 230–520 Вт при максимальной температуре 70–90°C. Представлены примеры использования контурных тепловых труб в таких системах. Здесь уместно упомянуть и работу [195], в которой разработана физико-математическая модель конденсации при кольцевом режиме течения применительно к разработке миниатюрной аммиачной контурной тепловой трубы для условий невесомости и при наличии силы тяжести. Для наземных условий разработан способ сопряжения модели кольцевого течения с моделью расслоенного течения, которое может реализовываться на конечном участке конденсации при уменьшении скорости пара и доминировании силы тяжести.

Исследования авторов [197–199] имеют или могут иметь непосредственное отношение к разработке систем охлаждения тепловыделяющих элементов спрейным потоком подаваемой жидкости для применения в микроэлектронике, силовой электронике, при создании методов защиты первой стенки термоядерных реакторов, подвергающейся разрушительному воздействию высокотемпературной плазмы. В новейшей работе [198] рассмотрены вопросы генерации диспергированного потока теплоносителя распределения капель в потоке по размерам в зависимости от расхода, давления и теплофизических свойств теплоносителя; процессы дробления и коагуляции капель; области размеров капель, устойчивых к дроблению. На базе уравнения движения и распределения капель в потоке по радиусу у сопла форсунки разработана программа расчета эволюции параметров факела распыла. В [199] продемонстрирована возможность измерения поля температур, размеров капель жидкости и картины орошения теплообменной поверхности при аэрозольном охлаждении с использованием высокоскоростных инфракрасной термографии, визуализации и прозрачного нагревательного элемента. Получены новые экспериментальные данные по интенсивности теплообмена, и, в частности, показано, что коэффициенты теплоотдачи при аэрозольном охлаждении и

1.5 раза выше максимальной теплоотдачи при мультиструйном орошении. При этом отмечено, что расход жидкости для аэрозольной форсунки практически в пять раз ниже расхода жидкости при использовании мультиструйной форсунки.

Хорошо известно, что значения характерных толщин кремниевых пластин, используемых при изготовлении современных чипов в микроэлектронике, составляют ориентировочно 0.7–2 мм. Режимы кипения при спрейнном, спреино-струйном орошениях различными диэлектрическими жидкостями непосредственно теплоотдающих поверхностей кремния, как следует из современных обзоров [126, 127, 132, 196], являются весьма перспективными способами интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока в рамках решения сложных технических задач охлаждения чипов в микроэлектронике. Очевидно, что традиционное использование массивных высокотеплопроводных нагревателей при моделировании теплообменных процессов при спрейнном, спреино-струйном охлаждении в таких режимах моделей чипов не является корректным. Демонстрация уникальных возможностей одновременного использования высокоскоростных термографической и видеосъемки через модели чипов (тонкие пластины из сапфира, кремния с тепловыделяющими пленками ИТО, прозрачными для видеоизображения) проведена авторами в ходе экспериментальных исследований [200, 201]. Способность одновременного получения обширной достоверной экспериментальной информации по распределениям температуры на поверхности модельных элементов чипов, микрохарактеристикам кипения и характеристикам нестационарных переходных процессов при кипении в условиях спрейнного, спреино-струйного орошений при варьировании плотности теплового потока и параметров орошения делает перечисленные методики весьма эффективным инструментом для проведения последующих исследований, направленных на решение данных важнейших и на сегодня довольно амбициозных по запрашиваемым индустрией характеристикам научно-технических проблем.

Даже такой краткий обзор опубликованных в журнале “Теплофизика высоких температур” работ наглядно отражает весьма значительный вклад советских и российских ученых в области изучения физики кипения, переходных процессов при кипении, разработки методов интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока при кипении жидкостей разных классов в различных гидродинамических условиях, в том числе в нестационарных режимах нагрева и охлаждения. Как было отмечено в работе С.А. Ковалева и А.И. Леонтьева “Достижения российских ученых в области исследования теплообмена при кипении” [202], вышедшей в ТВТ в 1999 г., “отражением важной роли российских ученых в решении проблемы теплообмена при кипении явля-

ются большое число публикаций в отечественных и зарубежных журналах и их активное участие в международных конференциях...”.

Сегодня можно смело констатировать, что передовые позиции советской и российских теплофизических школ в области исследований теплообмена при кипении выдержали испытание временем и ярко подтверждаются и сегодня новыми и новейшими достижениями, представленными в том числе в журнале ТВТ, в этой очень интересной и практически важной области теплофизики и в целом ряде приложений применительно к современным технологиям в энергетике, химической промышленности, криогенной технике, микроэлектронике и силовой электронике. Целый ряд российских ученых, результаты которых кратко упомянуты в данной работе, за достижения мирового уровня в области теплообмена при кипении стали лауреатами отечественных и международных премий: “Международная премия им. М. Якоба” (1969), премия им. И.И. Ползунова АН СССР (1976, академик АН СССР С.С. Кутателадзе); Государственная премия в области науки и техники (1985, чл.-корр. АН СССР А.В. Григорьев, чл.-корр. РАН Е.В. Аметистов, проф. Ю.М. Павлов), “Глобальная энергия” (2010, академик РАН А.И. Леонтьев), Премия Правительства РФ в области науки и техники (2002, академик РАН А.В. Клименко), “Международная премия им. А.В. Лыкова” (2020, чл.-корр. РАН А.Н. Павленко; 2022, проф. В.В. Ягов) и др.

Пожелаем же нашим новым и уже хорошо известным авторам плодотворных исследований в области кипения, разработки новейших высокоэффективных методов интенсификации теплообмена при кипении, результаты которых, опубликованные на страницах ТВТ и его переводной версии, открываются как для отечественной, так и для мировой научной общественности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллин В.А. // ТВТ. 1963. Т. 1. № 1. С. 3.
2. Лабунцов Д.А., Кольчугин Б.А., Головин В.С., Захарова Э.А., Владимирова Л.Н. // ТВТ. 1964. Т. 2. № 3. С. 446.
3. Головин В.С., Кольчугин Б.А., Захарова Э.А. // ТВТ. 1966. Т. 4. № 1. С. 147.
4. Присняков В.Ф. // ТВТ. 1970. Т. 8. № 2. С. 425.
5. Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. // ТВТ. 1971. Т. 9. № 3. С. 597.
6. Присняков В.Ф. // ТВТ. 1971. Т. 9. № 2. С. 341.
7. Леонов А.И., Присняков В.Ф. // ТВТ. 1972. Т. 10. № 1. С. 149.
8. Леонов А.И., Присняков В.Ф. // ТВТ. 1974. Т. 12. № 1. С. 137.
9. Чеканов В.В. // ТВТ. 1977. Т. 15. № 1. С. 121.
10. Кутателадзе С.С., Гогонин И.И. // ТВТ. 1979. Т. 17. № 4. С. 792.
11. Ягов В.В. // ТВТ. 1988. Т. 26. № 2. С. 335.

12. *Лабунцов Д.А., Ягов В.В.* // ТВТ. 1988. Т. 26. № 6. С. 1233.
13. *Буевич Ю.А., Уэббон Б.У.* // ТВТ. 1996. Т. 34. № 4. С. 573.
14. *Ягов В.В.* // ТВТ. 1996. Т. 34. № 4. С. 655.
15. *Дорофеев Б.М., Поддубная Н.А.* // ТВТ. 1999. Т. 37. № 5. С. 841.
16. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970. 660 с.
17. *Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В.* Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977. 288 с.
18. *Толубинский В.И.* Теплообмен при кипении. Киев: Наукова думка, 1980. 316 с.
19. *Веркин Б.И., Кириченко Ю.А., Русанов К.В.* Теплообмен при кипении криогенных жидкостей. Киев: Наукова думка, 1987. 264 с.
20. *Присняков В.Ф.* Кипение. Киев: Наукова думка, 1988. 240 с.
21. *Дорофеев Б.М., Волкова В.И.* Акустика кипения. 2-е изд. доп. и перераб. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2007. 352 с.
22. *Гогонин И.И.* Теплообмен при пузырьковом кипении. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 227 с.
23. *Лабунцов Д.А.* // ТВТ. 1967. Т. 5. № 4. С. 647.
24. *Черняк В.Г., Могилевский А.Е.* // ТВТ. 1980. Т. 18. № 5. С. 1032.
25. *Авдеев А.А., Зудин Ю.Б.* // ТВТ. 2012. Т. 50. № 4. С. 565.
26. *Лабунцов Д.А., Шевчук Е.Н., Пазюк П.А.* // ТВТ. 1965. Т. 3. № 2. С. 276.
27. *Субботин В.И., Сорокин Д.Н., Кудрявцев А.П.* // ТВТ. 1968. Т.6. № 4. С. 702.
28. *Кутателадзе С.С., Валукина Н.В., Гогонин И.И.* // ТВТ. 1967. Т. 5. № 5. С. 841.
29. *Андреев В.К., Деев В.И., Петровичев В.И.* (№ 858-76 Деп. от 22 III 1976) // ТВТ. 1976. Т. 14. № 2. С. 436.
30. *Андреев В.К., Деев В.И., Петровичев В.И., Смирнова Н.В.* (№ 4398-76 Деп. от 20/XII 1976) // ТВТ. 1976. Т. 14. № 2. С. 443.
31. *Григорьев В.А., Клименко А.В., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В.* // ТВТ. 1978. Т. 16. № 1. С. 117.
32. *Гогонин И.И.* // ТВТ. 2006. Т. 44. № 6. С. 915.
33. *Гогонин И.И.* // ТВТ. 2008. Т. 46. № 3. С. 413.
34. *Гогонин И.И.* // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1. С. 84.
35. *Морозкин В.И., Аменицкий А.Н., Аладьев И.Т.* // ТВТ. 1963. Т. 1. № 1. С. 107.
36. *Кириченко Ю.А., Долгой М.А.* // ТВТ. 1970. Т. 8. № 1. С. 130.
37. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача при конденсации и кипении. М.–Л.: Машгиз, 1952. 231 с.
38. *Лабунцов Д.А.* // Теплоэнергетика. 1960. № 5. С. 79.
39. *Ягов В.В.* // Теплоэнергетика. 1988. № 2. С. 4.
40. *Ягов В.В.* // Теплоэнергетика. 1995. № 3. С. 2.
41. *Yagov V.V.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2014. V. 73. P. 265.
42. *Федорович Е.Д.* // Теплоэнергетика. 2020. № 11. С. 76.
43. *Ягов В.В.* // Теплоэнергетика. 2020. № 11. С. 79.
44. *Павленко А.Н.* // Теплоэнергетика. 2020. № 11. С. 86.
45. *Зейгарник Ю.А., Васильев Н.В.* // Теплоэнергетика. 2020. № 11. С. 84.
46. *Готовский М.А.* // Теплоэнергетика. 2020. № 11. С. 95.
47. *Ягов В.В., Пузин В.А.* // Теплоэнергетика. 1985. Т. 10. С. 52.
48. *Зейгарник Ю.А.* // ТВТ. 1996. Т. 34. № 1. С. 52.
49. *Лабунцов Д.А., Ягов В.В.* Механика двухфазных систем. Учеб. пособ. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 384 с.
50. *Ивашкевич А.А.* // ТВТ. 2012. Т. 50. № 1. С. 112.
51. *Зейгарник Ю.А., Платонов Д.Н., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л.* // ТВТ. 2011. Т. 49. № 4. С. 584.
52. *Зейгарник Ю.А., Платонов Д.Н., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л.* // ТВТ. 2012. Т. 50. № 1. С. 83.
53. *Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л.* // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 436.
54. *Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Федюленко В.М.* // ТВТ. 2015. Т. 53. № 6. С. 881.
55. *Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Вавилов С.Н.* // ТВТ. 2021. Т. 59. № 3. С. 373.
56. *Варава А.Н., Дедов А.В., Комов А.Т., Малаховский С.А.* // ТВТ. 2009. Т. 47. № 6. С. 877.
57. *Kabir M.M., Downer J., Preller E., Tarau C., Yang B., Xu J.* // ТВТ. 2023. Т. 61. № 2. С. 285.
58. *Ковалев С.А.* // ТВТ. 1964. Т. 2. № 5. С. 780.
59. *Петухов Б.С., Ковалев С.А., Жуков В.М.* // ТВТ. 1971. Т. 9. № 6. С. 1260.
60. *Жуков С.А., Барелко В.В.* // ТВТ. 1989. Т. 27. № 5. С. 920.
61. *Ковалев С.А., Усатииков С.В.* // ТВТ. 1991. Т. 29. № 4. С. 730.
62. *Ковалев С.А., Усатииков С.В.* // ТВТ. 1998. Т. 36. № 5. С. 794.
63. *Ковалев С.А., Усатииков С.В.* // ТВТ. 2000. Т. 38. № 2. С. 262.
64. *Ковалев С.А., Усатииков С.В.* // ТВТ. 2000. Т. 38. № 3. С. 477.
65. *Габараев Б.А., Ковалев С.А., Молочников Ю.С., Соловьев С.Л., Усатииков С.В.* // ТВТ. 2001. Т. 39. № 2. С. 322.
66. *Ковалев С.А., Усатииков С.В.* // ТВТ. 2003. Т. 41. № 1. С. 77.
67. *Ячмаев С.Б., Жуков С.А.* // ТВТ. 2013. Т. 51. № 6. С. 958.
68. *Петухов Б.С., Ковалев С.А.* // Теплоэнергетика. 1962. № 5. С. 65.
69. *Zhukov S.A., Barelko V.V., Merzhanov A.G.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 1980. V. 24. № 1. P. 47.
70. *Павленко А.Н.* Переходные процессы при кипении и испарении. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2001. 449 с.
71. *Павлов П.А., Скрипов В.П.* // ТВТ. 1965. Т. 3. № 1. С. 109.
72. *Байдаков В.Г., Каверин А.М.* // ТВТ. 1981. Т. 19. № 2. С. 321.
73. *Спирин Г.Г., Черезов А.Н.* // ТВТ. 1981. Т. 19. № 2. С. 366.
74. *Никитин Е.Д., Павлов П.А.* // ТВТ. 2000. Т. 38. № 6. С. 915.
75. *Десятов А.В., Ильмов Д.Н., Кубышкин А.П., Черкасов С.Г.* // ТВТ. 2011. Т. 49. № 3. С. 436.
76. *Шевкунов С.В.* // ТВТ. 2012. Т. 50. № 2. С. 274.
77. *Шевкунов С.В.* // ТВТ. 2013. Т. 51. № 1. С. 86.
78. *Мальшев В.Л., Марьян Д.Ф., Моисеева Е.Ф., Гумеров Н.А., Ахатов И.Ш.* // ТВТ. 2015. Т. 53. № 3. С. 423.

79. Покусаев Б.Г., Некрасов Д.А. // ТВТ. 2008. Т. 46. № 3. С. 406.
80. Покусаев Б.Г., Некрасов Д.А., Таиров Э.А. // ТВТ. 2012. Т. 50. № 1. С. 89.
81. Покусаев Б.Г., Карлов С.П., Некрасов Д.А., Захаров Н.С. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 5. С. 753.
82. Жуков В.Е., Павленко А.Н., Мусеев М.И., Кузнецов Д.В. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 1. С. 85.
83. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
84. Скрипов В.П., Синицин Е.Н., Павлов П.А. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. М.: Атомиздат, 1980. 208 с.
85. Несис Е.И., Дорофеев Б.М. // ТВТ. 1976. Т. 14. № 1. С. 132.
86. Дорофеев Б.М. // ТВТ. 1979. Т. 17. № 5. С. 1024.
87. Толубинский В.И., Антоненко В.А. // ТВТ. 1981. Т. 19. № 4. С. 802.
88. Дорофеев Б.М. // ТВТ. 1985. Т. 23. № 3. С. 586.
89. Дорофеев Б.М., Поддубная Н.А. // ТВТ. 1996. Т. 34. № 6. С. 914.
90. Дорофеев Б.М. // ТВТ. 2002. Т. 40. № 3. С. 475.
91. Дорофеев Б.М., Волкова В.И. // ТВТ. 2005. Т. 43. № 4. С. 618.
92. Скоков В.Н., Решетников А.В., Коверда В.П., Виноградов А.В. // ТВТ. 2001. Т. 39. № 2. С. 316.
93. Скоков В.Н., Коверда В.П., Виноградов А.В., Решетников А.В. // ТВТ. 2010. Т. 48. № 5. С. 741.
94. Коверда В.П., Скоков В.Н., Виноградов А.В. // ТВТ. 2013. Т. 51. № 3. С. 471.
95. Скоков В.Н., Виноградов А.В., Решетников А.В., Коверда В.П. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 3. С. 366.
96. Лабунцов Д.А., Авдеев А.А. // ТВТ. 1981. Т. 19. № 3. С. 552.
97. Лабунцов Д.А., Авдеев А.А. // ТВТ. 1982. Т. 20. № 1. С. 88.
98. Лабунцов Д.А., Авдеев А.А. // ТВТ. 1982. Т. 20. № 2. С. 288.
99. Авдеев А.А., Зудин Ю.Б. // ТВТ. 2002. Т. 40. № 2. С. 292.
100. Авдеев А.А., Зудин Ю.Б. // ТВТ. 2002. Т. 40. № 6. С. 971.
101. Десятов А.В., Ильмов Д.Н., Кубышкин А.П., Черкасов С.Г. // ТВТ. 2011. Т. 49. № 3. С. 436.
102. Шагапов В.Ш., Коледин В.В. // ТВТ. 2013. Т. 51. № 4. С. 543.
103. Авдеев А.А. // ТВТ. 2014. Т. 52. № 4. С. 617.
104. Авдеев А.А. // ТВТ. 2015. Т. 53. № 4. С. 569.
105. Шагапов В.Ш., Зайнуллина О.А. // ТВТ. 2015. Т. 53. № 1. С. 91.
106. Авдеев А.А. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 769.
107. Бусов К.А., Мажейко Н.А. // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2. С. 316.
108. Храмов Д.П., Покусаев Б.Г., Некрасов Д.А., Вязьмин А.В. // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2. С. 195.
109. Суртаев А.С., Сердюков В.С., Павленко А.Н. // Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 11–12. С. 18.
110. Fang Y. Chen H., Zhang et al. // Renew Sustain Energy Rev. 2016. V. 62. P. 924.
111. Leong K.C., Ho J.Y., Wong K.K. // Appl. Therm. Eng. 2017. V. 112. P. 999.
112. Prakash J., Prasanth R. // Renew Sustain Energy Rev. 2018. V. 82. P. 4028.
113. Khan S., Atieh M., Koç M. // Energies. 2018. V. 11. № 11. P. 3189.
114. Kumar C.S.S., Kumar G.U., Arenales M.R.M., Hsu C.C., Suresh S., Chen P.H. // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 137. P. 868.
115. Xie S., Shahmohammadi B.M., Cai J., Zhao J. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 122. P. 275.
116. Li X., Cole J., Tu J. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 141. № 11. P. 20.
117. Liang G., Mudawar I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 124. P. 423.
118. Liang G., Mudawar I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 128. P. 892.
119. Дедов А.В. // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 18.
120. Ahangar Z.S., Aminfar H., Mohammad M. // Appl. Therm. Eng. 2019. V. 151. P. 11.
121. Cheng L.X., Xia G.D., Li Q.L., Thome J.R. // Heat Trans. Eng. 2019. V. 40. P. 1301.
122. Dadhich M., Prajapati O.S. // Renew Sustain Energy Rev. 2019. V. 112. № 12. P. 607.
123. Sandler S., Zajaczkowski B., Krolicki Z. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 126(A). P. 591.
124. Liang G., Mudawar I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 136. P. 324.
125. Liang G., Mudawar I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 146. P. 118864.
126. Liang G., Mudawar I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 115. P. 1174.
127. Liang G., Mudawar I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 115. P. 1206.
128. Liang G., Mudawar I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 117. P. 1352.
129. Liang G., Mudawar I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 117. P. 1368.
130. Mehralizadeh A., Shabanian S.R., Bakeri J. // Therm. Sci. Eng. Prog. 2020. V. 15. 100451.
131. Ijaola A.O., Bamidele E.A., Akisin C.J., Bello I.T., Oyatobo A.T., Abdulkareem A., Farayibi P.K., Asmatulu E. // Surfaces and Interfaces. 2020. V. 21. P. 100802.
132. Devahdhanush V.S., Mudawar I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2021. V. 169. P. 120893.
133. Sajjad U., Sadeghianjahromi A., Ali H.M., Wang C.C. // Appl. Therm. Eng. 2021. V. 195. P. 117074.
134. Chen J., Ahmad S., Cai J., Liu H., Ting Lau K., Zhao J. // Energy. 2021. V. 215. Pt. A. P. 119114.
135. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2. С. 280.
136. Volodin O.A., Pavlenko A.N., Pecherkin N.I. // J. Engng. Thermophys. 2021. V. 30. № 4. P. 1.
137. Павленко А.Н., Жуков В.И., Швецов Д.А. // Теплоэнергетика. 2022. № 11. С. 81.
138. Ковалев С.А., Смирнова Л.Ф. // ТВТ. 1968. Т. 6. № 4. С. 698.
139. Ковалев С.Л., Гешеле В.Д., Дервянко Д.Ж., Долгинцев И.М. // ТВТ. 1976. Т. 14. № 3. С. 559.
140. Гогонин И.И., Силкачев А.Е. // ТВТ. 1991. Т. 29. № 6. С. 1127.
141. Тырикович М.А., Леонтьев А.И., Малышенко С.П. // ТВТ. 1976. Т. 15. № 5. С. 998.
142. Ройзен Л.И., Рубин И.Р., Рачицкий Д.Г. // ТВТ. 1982. Т. 20. № 2. С. 304.

143. *Ройзен Л.И., Рачицкий Д.Г., Рачицкий Д.Г., Вертоградская Л.М., Юдина Л.А.* // ТВТ. 1983. Т. 21. № 2. С. 404.
144. *Крахин Ю.И., Куликов А.С.* // ТВТ. 1983. Т. 21. № 5. С. 952.
145. *Соловьев С.Л., Ковалев С.А.* // ТВТ. 1984. Т. 22. № 3. С. 528.
146. *Ковалев С.А., Соловьев С.А.* // ТВТ. 1984. Т. 22. № 6. С. 1166.
147. *Соловьев В.Л.* // ТВТ. 1987. Т. 25. № 6. С. 1173.
148. *Ковалев С.А., Шкловер Е.Г.* // ТВТ. 1988. Т. 26. № 4. С. 928.
149. *Мальшенко С.М., Андрианов А.Б., Макеев М.И.* // ТВТ. 1991. Т. 29. № 3. С. 548.
150. *Мальшенко С.К., Андрианов А.Б., Макеев М.М.* // ТВТ. 1991. Т. 29. № 4. С. 759.
151. *Ковалев С.А., Оводков О.А.* // ТВТ. 1995. Т. 33. № 6. С. 908.
152. *Мальшенко С.П., Зуев А.В., Левитан Л.Л., Андрианов А.Б., Орлова И.А.* // ТВТ. 1997. Т. 35. № 3. С. 424.
153. *Павленко А.Н., Цой А.Н., Суртаев А.С., Кузнецов Д.В., Калита В.И., Комлев Д.И., Иванников А.Ю., Радюк А.А.* // ТВТ. 2018. Т. 56. № 3. С. 424.
154. *Стерман Л.С., Вилемас Ю.В.* // ТВТ. 1965. Т. 3. № 4. С. 609.
155. *Стерман Л.С., Михайлов В.Д.* // Теплоэнергетика. 1963. № 2. С. 86.
156. *Кириченко Ю.А., Русанов В.К., Тюрина Е.Г.* // ТВТ. 1990. Т. 28. № 4. С. 747.
157. *Полежаев Ю.В., Ковалев С.А.* // ТВТ. 1992. Т. 30. № 5. С. 1013.
158. *Павленко А.Н., Володин О.А., Печеркин Н.И.* // ТВТ. 2013. Т. 51. № 6. С. 864.
159. *Сахнов А.Ю., Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н.* // ТВТ. 2023. Т. 61. № 4. С. 594.
160. *Жуков В.И., Павленко А.Н., Нагайцева Ю.В., Вайсс Д.* // ТВТ. 2015. Т. 53. № 5. С. 727.
161. *Швецов Д.А., Павленко А.Н., Брестер А.Е., Жуков В.И.* // ТВТ. 2023. Т. 61. № 3. С. 405.
162. *Васильев Н.В., Вараксин А.Ю., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А.* // ТВТ. 2017. Т. 55. № 6. С. 712.
163. *Артемов Б.В., Ивановский М.Н., Литвинов Л.А., Свириденко И.П.* // ТВТ. 1979. Т. 17. № 6. С. 1259.
164. *Антоненко В.А., Островский Ю.Н., Спиваков Ю.А.* // ТВТ. 1988. Т. 26. № 6. С. 1158.
165. *Павлов П.А., Виноградов В.Е.* // ТВТ. 2010. Т. 48. № 5. С. 717.
166. *Павленко А.Н., Суртаев А.С., Мацех А.М.* // ТВТ. 2007. Т. 45. № 6. С. 905.
167. *Павленко А.Н., Суртаев А.С., Цой А.Н., Стародубцева И.П., Сердюков В.С.* // ТВТ. 2014. Т. 52. № 6. С. 886.
168. *Павленко А.Н., Цой А.Н., Суртаев А.С., Кузнецов Д.В., Сердюков В.С.* // ТВТ. 2016. Т. 54. № 3. С. 393.
169. *Глазков В.В., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Игуменов В.С., Синкевич О.А., Цой В.Р., Швеиц В.Г.* // ТВТ. 2000. Т. 38. № 6. С. 935.
170. *Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Глазков В.В., Синкевич О.А.* // ТВТ. 2005. Т. 43. № 1. С. 100.
171. *Глазков В.В., Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Медвецкая Н.В., Оксман А.А., Синкевич О.А.* // ТВТ. 2006. Т. 44. № 6. С. 913.
172. *Глазков В.В., Киреева А.Н.* // ТВТ. 2010. Т. 48. № 3. С. 475.
173. *Агальцов А.М., Походалова А.Б., Шмельков Ю.Б.* // ТВТ. 2011. Т. 49. № 6. С. 924.
174. *Агальцов А.М., Вавилов С.Н., Киреева А.Н.* // ТВТ. 2015. Т. 53. № 4. С. 623.
175. *Дедов А.В., Забилов А.Р., Слива А.П., Федорович С.Д., Ягов В.В.* // ТВТ. 2019. Т. 57. № 1. С. 72.
176. *Лексин М.А., Ягов В.В., Забилов А.Р., Канин П.К., Виноградов М.М., Молотова И.А.* // ТВТ. 2020. Т. 58. № 3. С. 393.
177. *Канин П.К., Ягов В.В., Забилов А.Р., Молотова И.А., Виноградов М.М., Рязанцев В.А.* // ТВТ. 2021. Т. 63. № 2. С. 241.
178. *Синкевич О.А.* // ТВТ. 2007. Т. 45. № 2. С. 243.
179. *Синкевич О.А.* // ТВТ. 2021. Т. 59. № 1. С. 86.
180. *Герасимов Д.Н., Синкевич О.А.* // ТВТ. 2004. Т. 42. № 3. С. 484.
181. *Буланов Н.В., Гасанов Б.М., Турчанинова Е.А.* // ТВТ. 2006. Т. 44. № 2. С. 268.
182. *Буланов Н.В., Гасанов Б.М., Муратов Г.Н.* // ТВТ. 2009. Т. 47. № 6. С. 899.
183. *Гасанов Б.М., Буланов Н.В.* // ТВТ. 2010. Т. 48. № 3. С. 477.
184. *Буланов Н.В., Гасанов Б.М.* // ТВТ. 2011. Т. 49. № 2. С. 221.
185. *Розенцвайг А.К., Страшинский Ч.С.* // ТВТ. 2011. Т. 49. № 1. С. 139.
186. *Гасанов Б.М., Буланов Н.В.* // ТВТ. 2014. Т. 52. № 1. С. 93.
187. *Гасанов Б.М.* // ТВТ. 2018. Т. 56. № 4. С. 585.
188. *Гасанов Б.М.* // ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 76.
189. *Еронин А.А., Мальшенко С.П., Журавлев А.И.* // ТВТ. 2010. Т. 48. № 5. С. 798.
190. *Еронин А.А., Мальшенко С.П., Журавлев А.И.* // ТВТ. 2011. Т. 49. № 3. С. 444.
191. *Толубинский В.И., Антоненко В.А., Островский Ю.Н., Шевчук Е.Н.* // ТВТ. 1980. Т. 18. № 2. С. 367.
192. *Ковалев С.А., Соловьев С.Л.* // ТВТ. 1996. Т. 34. № 1. С. 63.
193. *Чернышева М.А., Майданик Ю.Ф.* // ТВТ. 2021. Т. 59. № 3. С. 362.
194. *Майданик Ю.Ф., Вершинин С.В.* // ТВТ. 2022. Т. 60. № 3. С. 407.
195. *Великанов А.А., Ильмов Д.Н., Кудряков С.Б., Нагорнова О.А., Соболев В.В.* // ТВТ. 2023. Т. 61. № 1. С. 130.
196. *Хи R., Wang G., Jiang P.* // J. Electronic Packaging. 2022. V. 144. P. 010802-1.
197. *Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И.* // ТВТ. 2014. Т. 52. № 4. С. 605.
198. *Алексеев В.Б., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Мариничев Д.В., Низовский В.Л., Низовский Л.В.* // ТВТ. 2015. Т. 53. № 2. С. 221.
199. *Комов А.Т., Захаренков А.В., Толмачев В.В., Штелинг В.С.* // ТВТ. 2023. Т. 61. № 3. С. 410.
200. *Суртаев А.С., Назаров А.Д., Миськив Н.Б., Сердюков В.С.* // ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 142.
201. *Сердюков В.С., Суртаев А.С., Павленко А.Н., Чернявский А.Н.* // ТВТ. 2018. Т. 56. № 4. С. 563.
202. *Ковалев С.А., Леонтьев А.И.* // ТВТ. 1999. Т. 37. № 6. С. 989.