

УДК 536.423.1

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДИСТОГО ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ

© 2019 г. А. В. Дедов¹, А. Р. Забиров¹, *, А. П. Слива¹, С. Д. Федорович¹, В. В. Ягов¹

¹НИУ “Московский энергетический институт”, Москва, Россия

*E-mail: Zabirov.arслан@gmail.com

Поступила в редакцию 16.11.2017 г.

После доработки 30.05.2018 г.

Принята к печати 05.06.2018 г.

Представлены результаты экспериментального исследования режимов теплообмена при охлаждении в воде нагретых до высокой температуры шаров из стали с технически гладкой и модифицированной поверхностью. Модификация состояла в нанесении на поверхность тонкодисперсного углеродистого покрытия с последующей электронно-лучевой обработкой. При охлаждении в недогретой до насыщения воде на обоих исследованных образцах возникает режим интенсивного теплообмена при пленочном кипении с тепловыми потоками на поверхности до 6 МВт/м². Значения теплового потока на основе исходных термограмм охлаждения получены решением одномерной обратной задачи теплопроводности. Углеродистое покрытие ведет к снижению температуры поверхности, отвечающей переходу к интенсивному режиму охлаждения, тогда как сам режим интенсивного охлаждения идентичен для образцов с разной обработкой поверхности. Экспериментальные результаты подтверждают предложенную авторами приближенную модель условий возникновения интенсивного режима охлаждения при пленочном кипении недогретой жидкости.

DOI: 10.1134/S0040364419010046

ВВЕДЕНИЕ

Пленочное кипение насыщенной (или слабо недогретой) жидкости объективно относится к наиболее простым для понимания видам кипения. В этом режиме температура обогреваемой поверхности превышает температуру предельного перегрева жидкости, что исключает возможность ее прямого контакта со стенкой; теплообмен определяется в основном теплопроводностью через паровую пленку, что предопределяет его низкую интенсивность. Изучение механизмов пленочного кипения имеет длительную историю, для расчета теплообмена предложены достаточно надежные расчетные уравнения [1–3]. При пузырьковом и переходном режимах кипения жидкость имеет прямой контакт со стенкой, наличие линий контакта трех фаз обеспечивает высокую интенсивность отвода тепла и огромные значения коэффициентов теплоотдачи (КТО) в сравнении не только с пленочным кипением, но и с конвекцией однофазной жидкости [4]. Строгое описание закономерностей теплообмена из “первых принципов” в этих режимах невозможно, разработка полуэмпирических моделей представляется наиболее рациональным методом теоретического анализа. То же можно сказать и о возможностях исследования механизмов интенсивного теплообмена при пленочном кипении недогретых жидкостей.

Впервые этот особый режим кипения (микропузырьковое кипение) описан в работе [5]. Он наблюдался при охлаждении медных сфер в воде при недогревах $\Delta T_{\text{sub}} > 22$ К; в отсутствие прямого контакта жидкости с поверхностью шара, температура которой (T_w) превышала критическую для воды (в ряде режимов на сотни градусов), тепловые потоки достигали невероятных для пленочного кипения значений – 5–7 МВт/м². По мнению авторов, значение результатов работы [5] до сих пор недостаточно оценено специалистами, о чем можно судить как по числу цитирований, так и по содержанию последующих публикаций по этой проблеме.

Пленочное кипение недогретой воды является частью технологических процессов в металлургии (охлаждение кристаллизатора в установках непрерывной разливки) и металлообработке (закалка). Однако технологов объективно интересует лишь высокая скорость охлаждения металла, а не механизмы процессов в охлаждающей жидкости. В литературе по технологии закалки встречаются утверждения о том, что охлаждение происходит в режиме пузырькового кипения, основанные только на том, что реальные КТО на один–два порядка превосходят те, что характерны для пленочного кипения. При этом не учитывается, что для пузырькового кипения необходим прямой контакт жидкость/стенка, а при перегревах воды (относи-

тельно T_w) в несколько сотен Кельвинов в режиме пузырькового кипения должны были бы наблюдаться фантастические тепловые потоки.

Работа [5] имела целью выяснение механизмов возникновения парового взрыва при взаимодействии расплава активной зоны реактора с охлаждающей водой (в результате тяжелой аварии на АЭС). В экспериментах, воспроизводящих паровой взрыв, никаких измерений температуры капли расплава, естественно, не проводится. Поэтому [5] следует рассматривать как новое направление в изучении пленочного кипения недогретых жидкостей.

Авторы настоящей статьи проводят систематическое изучение пленочного кипения недогретых жидкостей на протяжении почти десяти лет; близкие по содержанию исследования ведутся в ОИВТ РАН (см., например, [6]). В МЭИ выполнены серии экспериментов по охлаждению высокотемпературных шаров в жидкостях при различном сочетании условий и режимных параметров. Установлено, что в недогретой воде при $\Delta T_{\text{sub}} > 20\text{--}30$ К микро-пузырьковый режим кипения возникает при охлаждении образцов из материалов с сильно отличными свойствами (нержавеющая сталь, никель и медь). Насколько известно, только в работах [7–13] в подобных экспериментах температура охлаждаемого шара измеряется в центре и в нескольких точках на поверхности, а не в одной точке. Наличие нескольких поверхностных термопар позволило надежно определять температуру возникновения интенсивного режима охлаждения, скорость распространения фронта охлаждения поверхности и темп охлаждения шара. При атмосферном давлении интенсивный режим пленочного кипения наблюдается только на воде, а на неводных жидкостях (изопропанол, этанол, перфторгексан) устойчивое пленочное кипение сохраняется даже при очень больших значениях недогрева ($\Delta T_{\text{sub}} > 160$ К) [7, 8]. Для понимания качественных закономерностей процесса важны впервые проведенные эксперименты по охлаждению раскаленных металлических шаров в “горячей” воде (с температурой от 90 до 150°C) при давлении до 1.0 МПа [9]. В результате выявлено, что возникновение режима интенсивного пленочного кипения более всего зависит от недогрева жидкости, тогда как изменение ее свойств влияет слабо (в другой серии опытов охлаждение проводилось в воде при 10°C, когда динамическая вязкость в четыре–семь раз выше).

Анализ результатов экспериментов приводит к выводу о том, что режим интенсивного теплообмена при пленочном кипении недогретой жидкости возможен только в условиях охлаждения; при этом характерные плотности теплового потока при кипении в условиях свободного движения (в большом объеме) превосходят те, которые по-

лучают при стационарном пленочном кипении недогретой воды при высокой скорости вынужденного течения [10]. Такое заключение подтверждается сильным влиянием коэффициента тепловой активности металла на температуру охлаждаемой поверхности, при которой начинается этот режим: при погружении в воду с температурой 30°C на шарах из нержавеющей стали интенсивное охлаждение наблюдается практически сразу при $T_w > 700^\circ\text{C}$, тогда как на шарах из никеля и меди соответствующие значения T_w были заметно ниже [9]. На основе этих результатов была предложена приближенная модель возникновения интенсивного режима охлаждения, которая учитывает влияние недогрева и свойств охлаждающей жидкости, а также перегрева поверхности охлаждаемого образца и его тепловой активности [11]. Подтверждением модели являются представленные в этой работе впервые обнаруженные режимы интенсивного пленочного кипения сильно недогретого этанола при давлении ≥ 0.5 МПа в процессе охлаждения шара из нержавеющей стали. Качественным свидетельством в пользу модели служит и возникновение режима интенсивного пленочного кипения недогретого изопропанола в экспериментах на никелевых образцах со слоем сажи. В [12] обсуждаются эксперименты, в которых при охлаждении высокотемпературных образцов фиксировался электрический контакт между недогретой водой и твердой поверхностью, что также свидетельствует о наличии локальных контактов поверхности с охладителем. При этом в [6] подчеркивается, что продолжительность электрических контактов увеличивается вблизи температуры Лейденфроста. Таким образом, общий вывод о влиянии теплофизических свойств поверхности на возникновение режима интенсивного охлаждения сомнений не вызывает, хотя его конкретизация и получение количественной информации требуют новых исследований.

Отметим, что многие исследователи отождествляют температуру поверхности, при которой начинается переход от стабильного пленочного кипения к интенсивному, с температурой Лейденфроста. В [12] показано, что в ряде случаев за этим стоит слишком расширенное толкование понятия, делающее его неопределенным. Если следовать за первыми опытами автора открытия (1756 г.) и осмысливать их с сегодняшних позиций, то предельная температура твердой поверхности, при которой возможен ее прямой контакт с жидкостью, имеет строго определенное для данного вещества значение — это температура спиноплава. Многочисленные эксперименты В.П. Скрипова, продолжаемые его учениками и коллегами в институте теплофизики УрО РАН, убедительно доказывают, что достижение этой температуры ведет к практически мгновенному переходу жидкости в пар, т.е. к гомогенному зародышеобразо-

ванию. По мнению авторов, только приняв, что температура Лейденфроста T_{Leid} совпадает с температурой предельного перегрева жидкости T_{lim} (или гомогенного зародышеобразования T_{hom}), можно сделать эту величину однозначно определенной. Измеряемые в экспериментах значения температуры потери контакта жидкость/стенка при нагреве или начала этого контакта при охлаждении (минимальная температура пленочного кипения), если они отличны от T_{lim} , следует рассматривать как некоторые эффективные параметры, отражающие влияние микроструктуры и теплофизических свойств поверхности, а также гидродинамические эффекты взаимодействия жидкости со стенкой. Именно так интерпретируют результаты своих экспериментов авторы [14], которые использовали метод определения температуры Лейденфроста, основываясь на измерении времени испарения капли на исследуемой поверхности. В экспериментах было зафиксировано, что температура Лейденфроста повышается от общепринятой 280°C на полированной поверхности из нержавеющей стали до 455°C на поверхности с пирамидальной микроструктурой, полученной обработкой фемтосекундным лазером. В качестве одной из причин повышения T_{Leid} авторы обсуждают возможность протыкания (protruding) паровой пленки под каплей выступами поверхностной микроструктуры, поскольку, по их оценкам, толщина парового слоя приблизительно равна характерному размеру микроструктур, полученных лазерной обработкой.

К сожалению, чаще встречаются совсем иные подходы. Авторы [15] даже в название статьи упомянули “исключение пленочного кипения” при охлаждении сферы в морской воде с температурой 33°C . Начальная температура сферы (из нержавеющей стали) диаметром 17.5 мм была 1000°C ; авторы утверждают, что после “очень короткого периода переходного кипения устанавливается пузырьковое кипение”. При этом они, признавая, что температура сферы почти на 600°C превышает T_{hom} , предлагают очень сомнительное объяснение такой возможности. В данном случае температура измерялась термопарой, размещенной на расстоянии 1.5 мм от поверхности сферы, так что ее показания при огромных тепловых потоках, характерных для интенсивного охлаждения, могли отличаться от фактической температуры поверхности на сотни градусов. Кроме того, при кипении морской воды неизбежно выпадение твердых малотеплопроводных отложений. Следует отметить, что в экспериментах по нестационарному охлаждению при измерении температуры в одной точке (в центре шара или на некотором расстоянии от его поверхности) требуется особая осторожность в интерпретации результатов измерений, особенно при низкой теп-

лопроводности металла. Такие ошибки становятся неизбежными, если термопары монтируются непосредственно на поверхности образца, провоцируя ранний переход к высокоинтенсивному режиму пленочного кипения, что обсуждается в работе [13].

В [16] рассматривается влияние нанодобавок к воде на процесс закалки. Рабочие участки — сферы диаметром 1 см, выполненные из нержавеющей стали и циркониевого сплава, охлаждались в воде с температурой $30-100^\circ\text{C}$. Начальная температура сфер составляла 1000°C . Для создания “наножидкости” в воду добавлялись алюминиевые, кремниевые и алмазные наночастицы. Результаты экспериментов показали, что добавление в чистую воду наночастиц не влияет на характер процесса закалки. Однако при повторных экспериментах на одной и той же сфере процесс закалки сильно ускоряется. Такой эффект вызван отложениями наночастиц на поверхности сферы, что приводит к ранней дестабилизации паровой пленки. При этом температура, при которой пленочное кипение теряет устойчивость, на 150°C выше, чем при охлаждении в чистой воде. Эти эксперименты — еще одно свидетельство сильного влияния состояния поверхности образца на скорость закалки. В сильно недогретой жидкости коллапс паровой пленки начинается сразу после погружения нагретого шара в охлаждающую жидкость. По мнению авторов, это связано с уменьшением толщины паровой пленки, которая легче поддается дестабилизации отложившимися на поверхности сферы частицами.

В работе [17] проведены исследования влияния физико-химических свойств поверхности; выявлено, что нанесение покрытия из менее теплопроводного материала на образец из материала с высокой теплопроводностью (например, серебряный образец с никелевым покрытием) ускоряет процесс охлаждения образца. Авторы делают вывод, что для ускорения процесса закалки следует избегать пленочного кипения: вода должна быть насколько возможно холодной, коэффициент теплоусвоения (тепловой активности) поверхности низким. Заметим, что попытки исключить пленочное кипение при типичных температурах закалки не осуществимы в силу термодинамических законов, правильнее говорить о достижении интенсивного режима охлаждения в условиях пленочного кипения.

В работах [18, 19] показано, что температурой начала интенсивного охлаждения можно управлять, изменяя смачиваемость поверхности. В экспериментах использовались шары из нержавеющей стали диаметром 20 мм и цилиндры из нержавеющей стали диаметром 24 мм. Специальной обработкой были получены 4 типа поверхности — от супергидрофильной с контактным углом смачи-

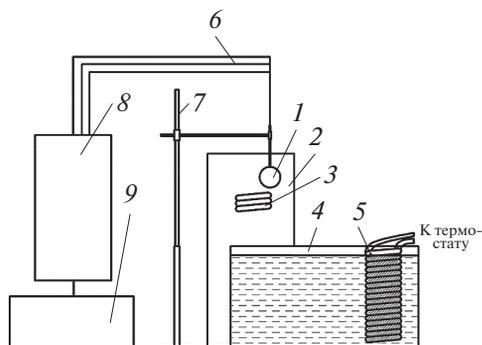


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – рабочий участок, 2 – ВЧ-индуктор, 3 – катушка индуктора, 4 – экспериментальный объем, 5 – змеевик термостата, 6 – термоэлектроды от рабочего образца, 7 – система перемещения рабочего образца, 8 – измерительный модуль, 9 – персональный компьютер.

вания $\theta < 10^\circ$, до супергидрофобной с $\theta > 160^\circ$. Шары нагревались до 700°C , а затем охлаждались в воде с температурой 22 или 100°C . Внутри шара было просверлено 2 мм-отверстие, в которое закладывалась термопара; локализация термопары и способ ее заделки в статьях не указаны. Процесс охлаждения снимался высокоскоростной видеокамерой; были построены зависимости изменения температуры шара во времени. Авторы пришли к заключению, что смачиваемость поверхности оказывает сильное влияние на режим охлаждения образца. На супергидрофильной поверхности всегда наблюдается пузырьковый режим кипения, а пленочное кипение отсутствует. На гидрофильной ($\theta < 30^\circ$) пленочное кипение сменяется пузырьковым при температуре поверхности шара $\sim 420^\circ\text{C}$, в то время как на супергидрофобной поверхности весь процесс охлаждения проходит в режиме пленочного кипения без видимого перехода к пузырьковому режиму кипения. Эти выводы вызывают сомнения, поскольку при температуре 700°C контакт жидкости со стенкой невозможен, а значит, невозможен и пузырьковый режим кипения. Вероятно, авторы за переход к пузырьковому режиму кипения принимают начало интенсивного охлаждения в режиме пленочного кипения недогретой воды (по терминологии авторов, достижение температуры Лейденфроста). Температура поверхности, при которой возникает дестабилизация паровой пленки, является температурой начала нового режима теплообмена, не более. Основная проблема состоит в понимании механизмов этой дестабилизации и резкого увеличения интенсивности теплообмена при этом переходе.

В настоящей работе исследовалось влияние на эти процессы углеродных покрытий поверхности шара из нержавеющей стали.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Схема установки. Эксперименты были проведены на экспериментальном стенде “Режимы охлаждения высокотемпературных поверхностей”. Этот стенд был создан на Кафедре инженерной теплофизики им. В.А. Кириллина в 2013 году в рамках программы развития материальной базы НИУ “МЭИ”. Основная цель стенда – получение новых экспериментальных данных, необходимых для моделирования охлаждения активной зоны реактора в процессе поставарийного залива, а также процессов, которые могут привести к возникновению парового взрыва. Подробное описание стенда можно найти в предшествующих публикациях авторов, например в [12, 13].

Эксперименты по изучению влияния свойств поверхности на охлаждение образцов в недогретой воде были проведены на открытой модификации стенда. Данная модификация позволяет проводить эксперименты только при атмосферном давлении. Схема стенда представлена на рис. 1. Рабочий участок 1, жестко прикрепленный с помощью трубки державки к штативу 7, нагревался в катушке индуктора 3 с помощью высокочастотной индукционной печи 2. По достижении нужной температуры образец погружался в объем исследуемой жидкости 4. Температура жидкости задавалась и поддерживалась постоянной с помощью змеевика, по которому циркулировал теплоноситель из термостата. Изменение температуры образца контролировалось с помощью пяти термопар 6, сигнал от которых поступал через коннектор NI SCXI-1303 на измерительный модуль NI SCXI-1102 8 и далее на ПК 9. В качестве рабочего участка использовались два шара из стали диаметром 39 мм. В первом случае использовался шар с технически гладкой поверхностью. Во втором случае поверхность шара модифицировалась согласно технологии, описанной ниже.

Отверстия для термопарных кабелей проделывались с помощью электроэрозионного ЧПУ станка из верхней точки шара по хордам на поверхность в точки с полярными углами 50, 90, 135 и 180° , спай еще одной термопары размещался в центре шара. Использовались кабельные хромель-алюмелевые (ХА) термопары с диаметром электродов 0.2 мм; наружный диаметр кабеля термопары не превышал 1 мм. Спаи поверхностных термопар приваривались лазерной сваркой к диску из того же металла, что и материал шара, толщиной до 100 мкм; затем диск приваривался заподлицо с поверхностью шара. Схема заделки термопар приведена на рис. 2. Места заделки тщательно обрабатывались наждачной бумагой, чтобы обеспечить однородность поверхности образца. Градуировка термопар, заложенных в рабочие участки, была проведена в диапазоне тем-

ператур от 20 до 100°C. Выяснилось, что для используемых термопар можно применять стандартную градуировочную зависимость ХА-термопар.

В условиях нестационарного охлаждения шара количественные характеристики интенсивности теплообмена требуют решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ). Методика восстановления условий на поверхности шара численным решением прямой осесимметричной задачи нестационарной теплопроводности подробно приводится в [13].

Методика нанесения углеродного покрытия на поверхность шара. В качестве обмазки поверхности шара использовалась сажа, полученная в плазме четырехэлектродного ВЧ-разряда в атмосфере гелия при потоке газа $(0.05-0.1) \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, частоте $66 \times 10^3 \text{ Гц}$ и токе дуги 220 А [20]. Electroды были ориентированы вдоль ребер пирамиды под углом 57°. Образующаяся в результате электродугового распыления углеродная наноструктурированная сажа обрабатывалась в установке типа SOXHLET с целью экстрагирования фуллеренов. Удельная поверхность оставшейся после экстракции фуллеренов сажи, измеренная методом ВЕТ на установке СОРБИ-М, оказалась равной $(238 \pm 5) \times 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$. Сажа тщательно измельчалась в керамической ступке с помощью пестика, после чего заливалась о-ксилолом в отношении 100 : 1 (по массе) при перемешивании до состояния однородной суспензии.

Стальной шар диаметром 39 мм обмакивался в суспензию, после чего просушивался в течение суток на воздухе при температуре 50°C и с целью улучшения адгезии отжигался в печи в слабом потоке аргона (до $1.7 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$) в течение 20 мин при температуре 600°C. Толщина полученной пленки оказалась в среднем равной 10^{-5} м , что соответствует плотности покрытия около $800 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В качестве источника электронного пучка использовалась электронная пушка установки серии АЭЛТК-12 производства ОАО НИТИ “Прогресс” с объемом камеры 12 м³, ускоряющее напряжение – $60 \times 10^3 \text{ В}$. Диаметр пучка составлял $\sim 5 \times 10^{-4} \text{ м}$.

Обрабатываемая поверхность сканировалась электронным пучком с частотой развертки 25 Гц и амплитудой 30 мм в направлении, перпендикулярном горизонтальной оси вращения шара (рис. 3). Крепление шара в вакуумной камере обеспечивало вращение шара на горизонтальном вале электропривода. Угловая скорость вращения шара – 5 об./мин. Электронная пушка была неподвижна. Таким образом, в результате электронно-лучевой обработки на поверхности шара возникал шероховатый шаровой пояс шириной 30 мм (рис. 3).

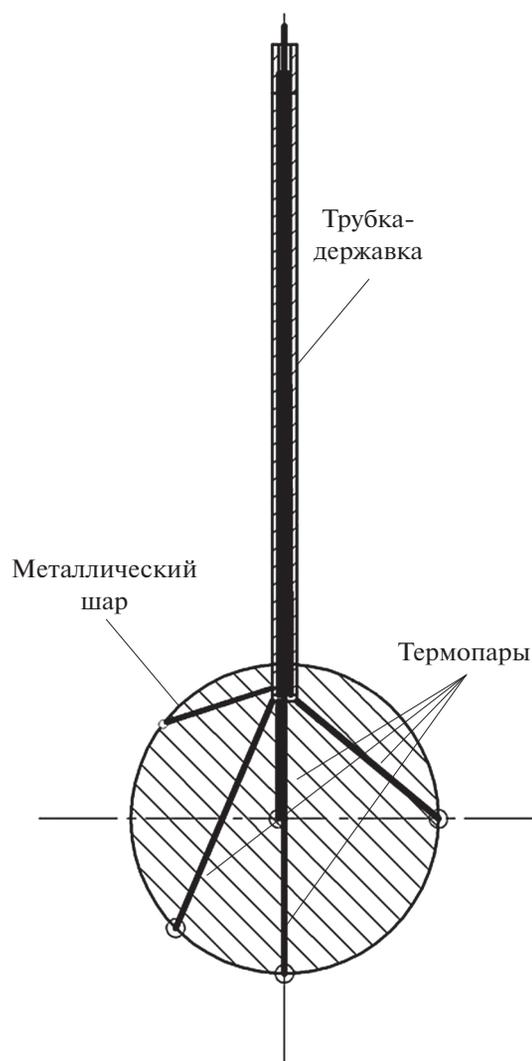


Рис. 2. Схема рабочего участка.

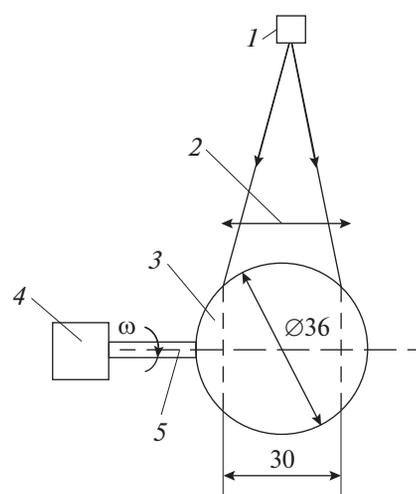


Рис. 3. Схема сканирования поверхности шара электронным пучком: 1 – электронная пушка; 2 – развертка луча (“пила”); 3 – стальной шар, обмазанный наноструктурированной сажой; 4 – электропривод вращения шара; 5 – вал крепления шара.

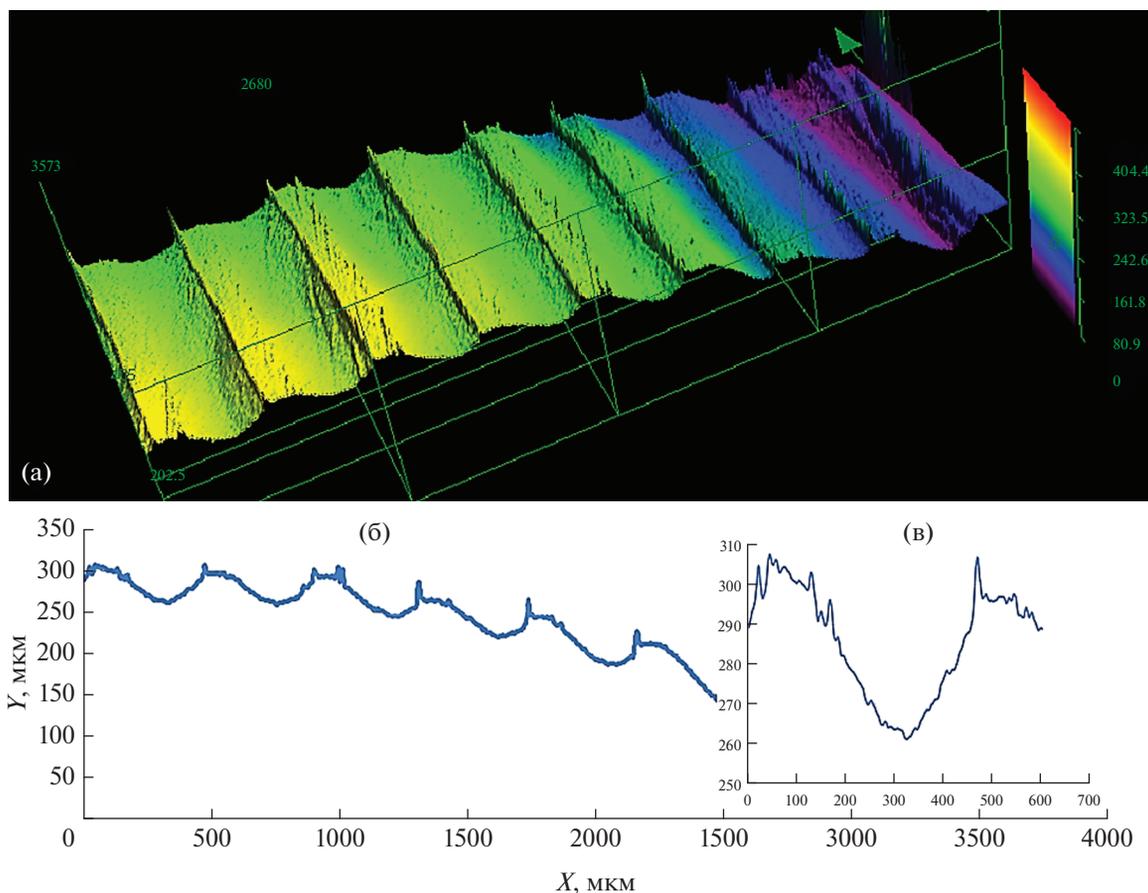


Рис. 4. Фотография рельефа поверхности шара (а), полученная с помощью лазерного конфокального микроскопа OLS Olympus LEXT 4000; (б), (в) – рельеф обработанной поверхности; координаты точек на графике – в мкм.

Для обработки оставшейся вне зоны действия пучка части поверхности шар закреплялся неподвижно на вертикальном штоке снизу. Верхняя часть поверхности шара сканировалась электронным пучком. Характеристики сканирования оставались прежними. В целом покрытие нанесено равномерно по периметру шара, однако узкую кольцевую зону в верхней части шара (шириной не более 3 мм) в области присоединения трубки-державки по технологическим причинам обработать не удалось. Визуальные наблюдения показали, что режим интенсивного охлаждения начинается в зоне нижней половины образца, на которой покрытие нанесено равномерно. Можно предположить, что влияние узкой кольцевой зоны в верхней части шара не оказывает влияние на возникновение режима интенсивного охлаждения.

Интенсивность облучения поверхности при фиксированной скорости развертки луча варьировалась в результате изменения тока пучка. Эксперименты проводились при энергии облучения 420 Дж/см^2 , при которой температура поверхности шара приближалась к температуре плавления

стали. Требуемая интенсивность облучения, достигалась при силе тока пучка электронов $25 \times 10^{-3} \text{ А}$.

Были измерены параметры неровностей обработанной поверхности шара с помощью лазерного конфокального микроскопа OLS Olympus LEXT 4000. Область сканирования с размерами $1.2 \times 3.5 \text{ мм}$ лежала на расстоянии 2–3 мм от края отверстия для термопары. Разрешение (точность) съемки – 1 мкм.

Как видно на рис. 4, рельеф обработанной поверхности представляет собой чередование параллельных гребней и впадин с перепадом высот до 60 мкм и шагом 470 мкм. Максимальная основная высота неровностей профиля (R) на вершинах гребней достигает 10 мкм и 5 мкм в области впадин. По данным, полученным в результате исследования поперечных шлифов стальных образцов, покрытых наноструктурированной сажей, глубина модифицированного приповерхностного слоя для плотности энергии электронного пучка 420 Дж/см^2 достигает 20 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние состояния поверхности на режимы теплообмена при охлаждении высокотемпературных тел в воде изучалось с использованием двух идентичных сферических образцов диаметром 39 мм из стали. Образцы отличались состоянием поверхности. Один из шаров после изготовления и заделки термопар многократно использовался в экспериментах с разными жидкостями. Возможно, в некоторых местах поверхность могла подвергаться действию коррозии и высокотемпературной оксидации. Однако после каждой серии экспериментов поверхность обрабатывалась наждачной бумагой, так что ее вполне можно считать технически гладкой. Поверхность второго шара была модифицирована путем нанесения углеродного покрытия по технологии, описанной выше.

Хотя первый из образцов использовался ранее во многих экспериментах, на нем была проведена новая серия опытов, совершенно идентичная тем, что затем была повторена на шаре с углеродным покрытием. Методика экспериментов принципиально не отличалась от ранее описанной [12, 13], когда охлаждение образцов проводилось в герметичном сосуде. Шар нагревался в катушке ВЧ-индуктора до 750–800°C и погружался в охлаждающую воду, температура которой поддерживалась на заданном уровне с помощью погруженного в сосуд теплообменника (змеевик 5 на рис. 1), связанного с термостатом. Большой в сравнении с охлаждаемым шаром объем жидкости (6 л) обеспечивал постоянство ее температуры в процессе эксперимента. Первичными данными для каждого опыта являются термограммы охлаждения — осуществляемая с частотой 100 Гц запись показаний термопар. Большой объем предшествующих экспериментов показал, что при охлаждении шаров из стали как в режимах устойчивого пленочного кипения [7], так и при интенсивном теплообмене [13, 12, 9] различия в показаниях поверхностных термопар были незначительными, что позволяет рассматривать поле температур внутри сферы как сферически симметричное. В этом случае восстановление условий на поверхности сферы на основе первичных термограмм (решение ОЗТ) сводилось к численному решению прямой, в сферических координатах одномерной, нестационарной задачи. На каждом временном шаге на основе итерационной процедуры подбирался коэффициент теплоотдачи, обеспечивающий совпадение расчетных значений температуры в центре и на поверхности с измеренными; в качестве измеренной температуры поверхности принималось осредненное значение показаний поверхностных термопар. Сферическая симметрия температурного поля позволяла рассматривать в качестве вполне достоверных режимы

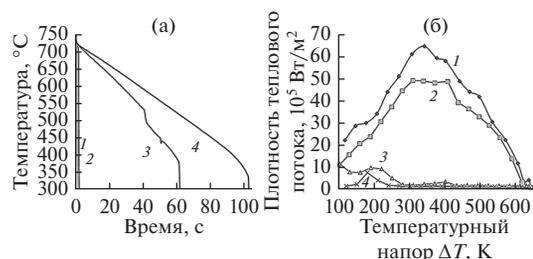


Рис. 5. Термограммы охлаждения шара с технической поверхностью (а) и плотность теплового потока (б) при температуре воды: 1 – 30°C, 2 – 50, 3 – 80, 4 – 95.

охлаждения и в условиях, когда часть поверхностных термопар выходила из строя.

На рис. 5 представлены результаты экспериментов по охлаждению образца с технической поверхностью. Рис. 5а представляет осредненные по показаниям двух поверхностных термопар термограммы охлаждения поверхности шара. Начальная температура шара перед погружением в жидкость здесь, как и во всех экспериментах, была примерно равна 750°C. Вид термограмм вполне согласуется с ранее полученными результатами, в том числе для охлаждения в недогретой воде никелевого шара при различных давлениях [12]. На рис. 5а прослеживается сильное влияние недогрева воды на характер охлаждения. В условиях, близких к состоянию насыщения, когда недогрев составлял $\Delta T_{\text{sub}} = 5$ К, охлаждение проходило в основном в режиме устойчивого пленочного кипения; падение температуры поверхности от 740 до 300°C заняло ~100 с. Режим интенсивного теплообмена начался, когда осредненная температура поверхности опустилась ниже критической для воды и на поверхности сферы, вероятно, существовали области переходного и даже пузырькового кипения. С ростом недогрева паровая пленка становится тоньше, интенсивность теплоотдачи в режиме устойчивого пленочного кипения растет [7, 8], что хорошо видно по кривой 3 для $\Delta T_{\text{sub}} = 20$ К. Длительность этого режима составляла около 40 с. При снижении средней температуры поверхности T_w до ~530°C паровая пленка теряет устойчивость (под влиянием возмущений на межфазной поверхности, вызванной свободноконвективным течением у ее границы). А при $T_w^{\text{cr}} \approx 380^\circ\text{C}$ начинается режим интенсивного теплообмена с очевидным наличием зон прямого контакта жидкость/стенка на поверхности. Общее время охлаждения образца для обсуждаемого режима уменьшилось почти вдвое в сравнении с охлаждением в воде с малым недогревом.

Термограмма 3 на рис. 5а качественно похожа на полученную в некоторых экспериментах [5] при охлаждении медных сфер различного диаметра. В этой работе недогрев $\Delta T_{\text{sub}} \approx 22$ К принят

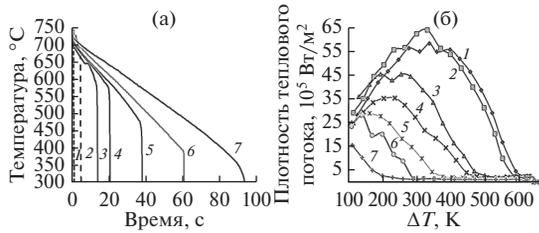


Рис. 6. Термограммы охлаждения шара с модифицированной поверхностью (а) и величина плотности теплового потока (б) при температуре воды: 1 – 30°C, 2 – 40, 3 – 50, 4 – 60, 5 – 70, 6 – 80, 7 – 90.

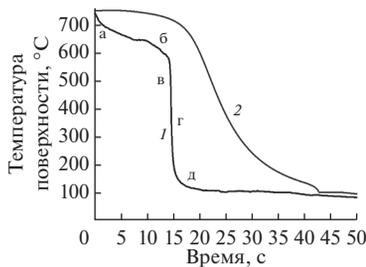


Рис. 7. Термограмма охлаждения шара с углеродистым покрытием в воде с температурой 50°C: 1 – температурные показания поверхностной термопары, расположенной на экваторе (90°); 2 – в центре шара.

за границу перехода от устойчивого пленочного кипения к режиму микропузырькового кипения при температуре поверхности, превышающей критическую для воды. Меньший диаметр сферы, существенно более высокая теплопроводность металла и вынужденное течение воды приводили к уменьшению участка с устойчивым пленочным кипением, по сравнению со случаем охлаждения стального шара при $\Delta T_{\text{sub}} = 20 \text{ К}$. В наших экспериментах при недогревах воды $\Delta T_{\text{sub}} = 50$ и 70 К интенсивный режим охлаждения начинался сразу после погружения образца в воду, т.е. при температуре поверхности около 750°C. При этом темп охлаждения поверхности достигает 700 К/с. Для расчета КТО и теплового потока на поверхности численно решалась ОЗТ. Из рис. 5б видно, что в режимах интенсивного охлаждения максимум теплового потока q достигает значений в 5 МВт/м^2 при недогреве в 50 К и 6.5 МВт/м^2 при недогреве в 70°C . Эти значения соответствуют температуре стенки $400\text{--}500^\circ\text{C}$. При тех же температурах стенки, но в режимах устойчивого пленочного кипения (малые недогревы) плотность теплового потока не превышала 0.5 МВт/м^2 . Значения КТО, отнесенные к температуре насыщения воды, ведут себя похожим образом. Отметим, что максимальные значения КТО и q увеличиваются и смещаются в сторону более высоких температур с ростом недогрева.

В целом эксперименты по охлаждению шара с технически гладкой поверхностью подтвердили наличие особого режима пленочного кипения недогретой воды, который начинался при температурах, существенно превышающих температуру предельного перегрева, и отличался интенсивностью, на порядок более высокой, чем при пленочном кипении насыщенной жидкости.

Эксперименты по охлаждению шара с модифицированной поверхностью в воде выполнены в том же диапазоне недогревов. На рис. 6 представлены осредненные по поверхности термограммы для образца с углеродистым покрытием и расчетные значения теплового потока. Качественно характер зависимостей подобен тем, что получены на шаре с технически гладкой поверхностью. На рис. 6а хорошо прослеживается рост температуры поверхности, отвечающей началу интенсивного охлаждения, с увеличением недогрева охлаждающей воды. Практически каждый режим имеет область с устойчивым пленочным кипением. При недогреве в 20°C температура перехода составляет $T_w^{\text{cr}} = 400^\circ\text{C}$; увеличение недогрева на 10°C ведет к росту температуры перехода почти на 80°C .

При $\Delta T_{\text{sub}} \geq 50 \text{ К}$ T_w^{cr} превосходит 650°C .

На рис. 6б представлено изменение расчетных значений плотности теплового потока в зависимости от перегрева поверхности; процесс охлаждения в координатах этого рисунка идет справа налево. Ясно, что с ростом недогрева плотность теплового потока растет, и ее максимум смещается в область более высоких температур стенки. При $\Delta T_{\text{sub}} = 30 \text{ К}$ максимальный тепловой поток около 3 МВт/м^2 соответствует температуре поверхности 280°C , при недогреве 50 К тепловой поток 4.5 МВт/м^2 наблюдался в диапазоне температур поверхности $300\text{--}400^\circ\text{C}$. При максимальных недогревах ($\Delta T_{\text{sub}} = 60$ и 70 К) тепловые потоки на уровне $5.5\text{--}6 \text{ МВт/м}^2$ отвечают температуре поверхности $400\text{--}550^\circ\text{C}$. Максимальные значения КТО, зафиксированные в экспериментах с образцами с углеродистым покрытием, достигали $20\text{--}25 \text{ кВт/(м}^2 \text{ К)}$.

Рис. 7 и 8 позволяют более детально проследить развитие процесса в типичной реализации эксперимента. На рис. 7 представлена термограмма охлаждения образца с углеродистым покрытием в воде при температуре 50°C . В момент погружения температура шара была однородной по объему и составляла 750°C . Так как температура поверхности превышала температуру спинодали охлаждающей жидкости, ее прямой контакт со стенкой невозможен. Как видно на рис. 8а, наблюдается устойчивое пленочное кипение с тонкой гладкой паровой пленкой. Интенсивность теплообмена при этом достаточно низкая, темп охлаждения поверхности шара, как это следует из

рис. 7, составляет около 10 К/с. Заметим, что температура в центре шара за первые 15 с охлаждения снизилась лишь на 30°C, тогда как на поверхности – на ~170°C.

С падением температуры поверхности становятся возможны локальные контакты жидкости с выступами шероховатости стенки, если они охлаждены ниже температуры предельного перегрева жидкости, $T_w \leq T_{lim}$. На поверхности шара возникают области возмущения паровой пленки (рис. 8б). В [11] рассматривается следующая возможность развития событий. В недогретой жидкости на границе с паровой пленкой развивается свободноконвективное подъемное течение. Межфазная поверхность жидкость/пар становится волновой, гребни волн жидкости касаются выступов микрошероховатости теплоотдающей поверхности. После возникновения контакта возможны два сценария развития процесса: восстановление паровой пленки или ее коллапс с последующим переходом к интенсивному режиму охлаждения. Согласно [11], “выбор сценария” определяется отношением теплового потока, обусловленного интенсивным испарением жидкости в зоне контакта трех фаз, к тепловому потоку за счет нестационарной теплопроводности из объема охлаждаемого тела. Таким путем определен с точностью до числового множителя безразмерный комплекс:

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

Здесь ρ , c , λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность металла; t_0 – характерное время контакта жидкости с выступами поверхностной шероховатости; ΔT_0 – разность средней температуры поверхности (T_w^{cr}) и T_{lim} . Временной масштаб t_0 определен как период волнового движения на межфазной поверхности. На недавней конференции [21] значение комплекса K_0 было представлено в конкретизированной форме и показано, что он действительно позволяет найти условия перехода к интенсивному режиму теплообмена при пленочном кипении недогретой жидкости. В деталях физическая модель представлена в публикации [22].

В рассматриваемом примере этот комплекс при $\Delta T_0 \geq 300$ К больше единицы, что означает распространение фронта интенсивного охлаждения по поверхности образца. Термограмма на рис. 7 и видеокadres на рис. 8б, 8в и 8г подтверждают этот факт и, таким образом, находятся в согласии с предлагаемой моделью. Температура поверхности, при которой устойчивое пленочное кипение переходит в режим интенсивного теплообмена, выше температуры спинодали воды и составляет ~600°C. В режиме интенсивного теплообмена наблюдаются огромные скорости охла-

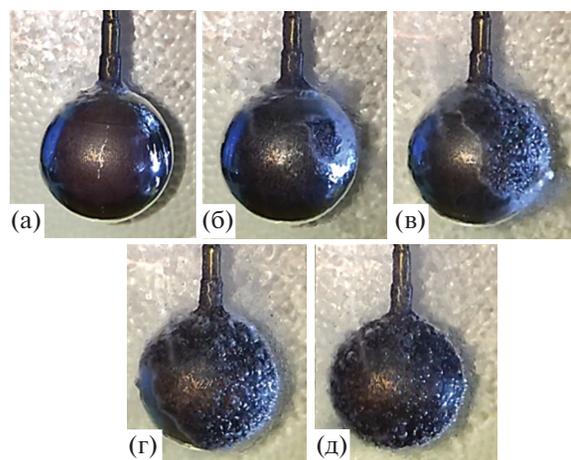


Рис. 8. Охлаждение шара с углеродистым покрытием в воде при температуре 50°C; время после погружения образца в воду: (а) – 2 с, (б) – 13, (в) – 14, (г) – 15, (д) – 18.

ждения поверхности; в этом примере они достигают значений 500 К/с. Из рис. 7 хорошо видно, насколько неинформативна термограмма, отражающая изменение температуры в центре образца: когда температура поверхности упала до 100°C, температура центра оставалась около 700°C. Для низкотеплопроводных металлов при исследовании режимов охлаждения шара едва ли возможно получить достоверную количественную информацию, опираясь на показания термомпары – центральной или расположенной на некотором расстоянии от поверхности (как в [15]).

При качественном сходстве режимов охлаждения на образцах с технической гладкой и модифицированной поверхностью, их количественные характеристики заметно различаются. Для режимов охлаждения, соответствующих максимальным недогревам $\Delta T_{sub} = 70^\circ\text{C}$, на образце с гладкой поверхностью интенсивный режим наступает сразу после погружения шара в жидкость, тогда как на образце с углеродистым покрытием в течение почти 2 с наблюдалась устойчивая паровая пленка, темп охлаждения был низким. Температура перехода к интенсивному режиму охлаждения для шара с покрытием оказалась на 40°C ниже, чем для технической гладкой. Если сравнивать изменение расчетной плотности теплового потока во времени для этих двух поверхностей, то больших отличий не наблюдается. Максимальный тепловой поток для шара с углеродистым покрытием лишь на 10% (0.5 МВт/м²) меньше по сравнению с гладкой поверхностью.

Отличия в скорости охлаждения выражены сильнее при меньших недогревах. Так, при $\Delta T_{sub} = 50$ К общее время охлаждения шара от 750 до 300°C для образца с углеродистым покрытием в 15 раз больше, чем для образца с технической

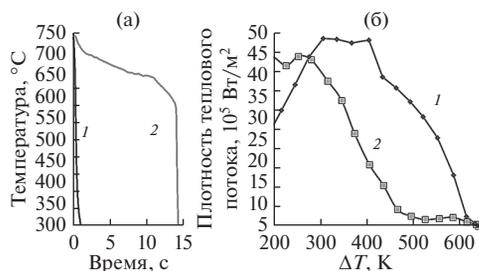


Рис. 9. Сравнение термограмм охлаждения (а) и плотностей тепловых потоков (б) при охлаждении 39 мм стального шара в воде с температурой 50°C: 1 – необработанная поверхность, 2 – модифицированная поверхность.

гладкой поверхностью. Как показано на рис. 9а, это обусловлено более низкой (на 100–150 К) температурой перехода от устойчивого пленочного кипения к режиму интенсивного охлаждения. Таким образом, из общего времени охлаждения (~15 с) большая его часть (около 12 с) приходится на устойчивое пленочное кипение, в процессе которого поверхность охлаждается до T_w^{cr} . Поскольку скорость охлаждения в режиме интенсивного охлаждения на 2 порядка выше, чем в режиме устойчивого пленочного кипения, ясно, что общее время охлаждения шара определяется моментом смены этих режимов. На рис. 9б хорошо видна разница в интенсивности охлаждения двух образцов: при температурном напоре от 600 до 500°C на образце с углеродистым покрытием плотность теплового потока на порядок ниже, чем на образце с технически гладкой поверхностью. Однако, как только на образце с углеродистым покрытием температура поверхности снижается до T_w^{cr} , и начинается режим интенсивного теплообмена, значения плотности теплового потока на обоих образцах становятся близкими, доходя за короткое время до максимального значения (4.5–5 МВт/м²).

С учетом описанной выше приближенной модели можно полагать, что причиной снижения T_w^{cr} на образце с углеродистым покрытием является более высокая теплопроводность покрытия в сравнении с материалом шара. На кафедре Инженерной теплофизики были проведены предварительные эксперименты по определению температуропроводности покрытия необработанной стали и стали с углеродистым покрытием методом лазерной вспышки. Измеренная температуропроводность обработанных образцов заметно превышает температуропроводность необработанного образца (5.47 и 3.68 мм²/с соответственно). Таким образом, можно говорить о качественном согласии полученных результатов с обсуждаемой моделью.

К настоящему моменту модель не учитывает влияния структуры покрытия на переход к интенсивному режиму охлаждения. Логично предположить, 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, что нашло отражение в недавних публикациях, например [23, 24]. В дальнейшем авторы планируют в рамках разрабатываемого подхода провести численное моделирование распределения температуры в двухслойных системах металл/покрытие при интенсивном локальном охлаждении участка поверхности, чтобы оценить влияние структуры, толщины и свойств покрытия на распространение зоны охлаждения. Пока можно говорить лишь о качественном соответствии полученных результатов с обсуждаемой моделью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально установлено, что охлаждение идентичных по геометрическим характеристикам сферических образцов из стали в недогретой воде проходит качественно одинаково независимо от состояния поверхности. При атмосферном давлении при недогревах воды до насыщения $\Delta T_{sub} \geq 20$ К на обоих исследованных образцах возникает режим интенсивного теплообмена при пленочном кипении.
2. Переход к режиму интенсивного охлаждения на шаре с углеродистым покрытием наступает при более низких температурах поверхности, чем на шаре с технически гладкой поверхностью; это означает более длительное время охлаждения при устойчивом пленочном кипении в первом случае.
3. Режим интенсивного охлаждения для образцов с разной обработкой поверхности идентичен по скорости охлаждения и характеру зависимости q от ΔT .
4. Эксперименты качественно подтвердили предложенную в [23] приближенную модель, определяющую условия перехода к интенсивному режиму теплообмена при пленочном кипении недогретой жидкости.

Работа выполнена в Национальном исследовательском университете “МЭИ” при поддержке Российского научного фонда (гранты № 16-19-10531 и № 17-79-20402).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bromley L.A. Heat Transfer In Stable Film Boiling // Chem. Eng. Prog. 1950. V. 46. № 5. P. 221.

2. *Dhir V.K., Purohit G.P.* Subcooled Film-Boiling Heat Transfer From Spheres // Nucl. Eng. Design. 1978. V. 47. P. 49.
3. *Аметистов Е.В., Клименко В.В., Павлов Ю.М.* Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1995.
4. *Ягов В.В.* Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. М.: Изд. дом МЭИ, 2014. 542 с.
5. *Aziz S., Hewitt G.F., Kenning D.B.R.* Heat Transfer Regimes in Forced-Convection Film Boiling on Spheres // Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf. San Francisco. 1986. V. 5. P. 2149.
6. *Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Оксман А.А., Белов К.И.* Экспериментальное исследование характеристик взрывного вскипания недогретой воды на горячей поверхности при смене режимов кипения // ТВТ. 2009. Т. 47. № 6. С. 891.
7. *Yagov V.V., Lexin M.A., Zabiroy A.R., Denisov M.A.* Film Boiling of Subcooled Liquids. Part II: Steady Regimes of Subcooled Liquids Film Boiling // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 100. P. 918.
8. *Ягов В.В., Забиroy А.Р., Канин П.К. и др.* Теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости: новые опытные результаты и расчетные уравнения // ИФЖ. 2017. Т. 90. № 2. P. 287.
9. *Yagov V.V., Zabiroy A.R., Kaban'kov O.N., Minko M.V.* Heat Transfer During Cooling of High Temperature Spheres in Subcooled Water at Different Pressures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 110. P. 219.
10. *Забиroy А.Р., Ягов В.В., Кабаньков О.Н., Лексин М.А., Канин П.К.* Влияние давления на устойчивое пленочное кипение недогретой жидкости // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 6. С. 1487.
11. *Zabiroy A.R., Yagov V.V., Kanin P.K.* Intensive Cooling Metallic Bodies with Low Thermal Conductivity in Film Boiling of Ethanol // J. Phys.: Conf. Series. 2017. V. 891. № 1.
12. *Yagov V.V., Lexin M.A., Zabiroy A.R., Kaban'kov O.N.* Film Boiling of Subcooled Liquids. Part I. Leidenfrost Phenomenon and Experimental Results for Subcooled Water // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 100. P. 908.
13. *Ягов В.В., Забиroy А.Р., Лексин М.А.* Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 70.
14. *Kruse C., Anderson T., Wilson C., Zuhlke C., Alexander D., Gogos G., Ndao S.* Extraordinary Shift of the Leidenfrost Temperature from Multiscale Micro/Nanostructured Surfaces // Langmuir. 2013. V. 29. № 14. P. 9798.
15. *Hsu S.-H., Ho Y.-H., Ho M.-X., Wang J.-C., Pan C.* On the Formation of Vapor Film During Quenching in De-ionized Water and Elimination of Film Boiling During Quenching in Natural Sea Water // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 86. P. 65.
16. *Kim H., DeWitt G., McKrell T., Buongiorno J., Hu Lin-wen.* On the Quenching of Steel and Zircaloy Spheres in Water-Based Nanofluids with Alumina, Silica and Diamond Nanoparticles // Int. J. Multiphase Flow. 2009. V. 35. P. 427.
17. *Moreaux F., Beck G., Archambault P.* Effect of Workpiece Surface Properties on Cooling Behavior. Quenching Theory and Technology. Second Ed. Liscic B., Tensi H.M., Canale L.C.F., Totten G.E. Publ.: CRC Press Book, 2010.
18. *Vakarelski I.U., Derek Y.C.Ch., Sigurdur T.Th.* Leidenfrost Vapour Layer Moderation of the Drag Crisis and Trajectories of Superhydrophobic and Hydrophilic Spheres Falling in Water // Soft Matter. 2014. V. 10. № 31. P. 5662.
19. *Vakarelski I.U., Patankar N.A., Marston J.O., Chan D.Y., Thoroddsen S.T.* Stabilization of Leidenfrost Vapour Layer by Textured Superhydrophobic Surfaces // Nature. 2012. V. 489(7415). P. 274.
20. *Churilov G.N., Popov A.A., Vnukova N.G. et al.* A Method and Apparatus for High-Throughput Controlled Synthesis of Fullerenes and Endohedral Metal Fullerenes // Tech. Phys. Lett. 2016. V. 42. № 5. P. 475.
21. *Ягов В.В., Забиroy А.Р., Кабаньков О.Н.* Теплообмен при охлаждении высокотемпературных тел в недогретой жидкости // V Рос. конф. "Метастабильные состояния и флуктуационные явления". Тез. докл. Екатеринбург, Россия. 17–19 окт. 2017. С. 78.
22. *Kanin P.K., Ryazantsev V.A., Lexin M.A., Zabiroy A.R., Yagov V.V.* Heat Transfer Enhancement at Increasing Water Concentration in Alcohol in the Process of Non-Stationary Film Boiling // J. Phys.: Conf. Series. 2018. V. 980. № 1. 012029.
23. *Yagov V.V., Zabiroy A.R., Kanin P.K.* Heat Transfer at Cooling High-Temperature Bodies in Subcooled Liquids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 126. Part A. P. 823.
24. *Павленко А.Н., Цой А.Н., Суртаев А.С., Кузнецов Д.В., Сердюков В.С.* Влияние низкотеплопроводного покрытия на динамику повторного смачивания перегретой пластины стекающей пленкой жидкости // ТВТ. 2016. Т. 54. № 3. С. 393.