

УДК 536.423.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕЛ В БИНАРНОЙ СМЕСИ ВОДА–ИЗОПРОПАНОЛ

© 2020 г. М. А. Лексин¹, В. В. Ягов¹, А. Р. Забиров^{1,2,*}, П. К. Канин¹,
М. М. Виноградов¹, И. А. Молотова^{1,2}

¹НИИУ “Московский энергетический институт”, Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: zabirov.arслан@gmail.com

Поступила в редакцию 29.10.2019 г.

После доработки 09.12.2019 г.

Принята к публикации 24.12.2019 г.

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. 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 изопропанолу подобный режим не возникает даже при предельно высоких достигнутых недогревах. Этим обусловлена целесообразность проведения экспериментов по охлаждению высокотемпературных образцов в бинарной смеси вода–изопропанол. Впервые была определена граничная концентрация изопропилового спирта в смеси, при которой возникает режим интенсивного охлаждения при пленочном кипении.

DOI: 10.31857/S0040364420030114

ВВЕДЕНИЕ

Комплексное экспериментальное и теоретическое изучение пленочного кипения недогретых жидкостей в условиях охлаждения высокотемпературных поверхностей в большом объеме имеет принципиальное значение для понимания механизмов инициирования парового взрыва, выявления закономерностей послеаварийного охлаждения активной зоны ядерного реактора, а также дает возможность теоретически описать закономерности охлаждения металлических изделий при закалке.

Отметим, что из трех основных режимов кипения жидкостей пленочное кипение объективно является наиболее удобным для теоретического анализа. Наличие непрерывной границы раздела фаз пар–жидкость позволяет успешно строить модели теплообмена при пленочном кипении насыщенной жидкости, по крайней мере, в тех случаях, когда межфазная поверхность действительно сохраняет непрерывность [1–4]. Однако пленочное кипение недогретой жидкости в характерных для закалки условиях отличается от указанного выше тем, что этот процесс нестационарный.

В относительно недавнее время стало ясно, что при больших недогревах жидкости пленочное кипение во многих отношениях выглядит не-

предсказуемым даже в условиях свободного движения жидкости. В конце 1980-х гг. английскими учеными (D.V.R. Kenning, G.F. Hewitt и их аспиранты) было экспериментально исследовано пленочное кипение недогретой воды в процессе охлаждения медных сфер [5–7]. В их работах, имевших целью раскрыть механизм запуска парового взрыва, впервые была показана возможность получения при пленочном кипении коэффициентов теплоотдачи (КТО) до 10 кВт/(м² К). Авторы [5–7] назвали режимы со столь высокими КТО “микробузырьковым кипением” (microbubble boiling), исходя из визуальных наблюдений за процессом (отметим, что при высоких приведенных давлениях аналогичный процесс проходит без выделения в жидкую фазу пузырьков [8]). Они указали нижнюю границу недогрева воды (22 К при атмосферном давлении), при котором такие режимы наблюдались.

Сходный термин (microbubble emission boiling) используют для другого режима, возникающего в недогретой жидкости в окрестности критического теплового потока, при намного меньших температурных напорах [9, 10]. К сожалению, кроме нового термина, в настоящее время предложены только качественные гипотезы о механизмах этого процесса.

Пока в распоряжении исследователей, помимо экспериментальных данных английских ученых, есть только крайне немногочисленные термограммы охлаждения опытных образцов при закалке [11, 12]. При этом в ряде случаев такие данные не очень представительны, поскольку при наличии термопары, заделанной в центре образца, предсказать с высокой точностью температуру на поверхности практически невозможно.

В настоящее время экспериментальные и теоретические исследования закономерностей взаимодействия нагретой до высоких температур металлической поверхности с недогретой жидкостью проводятся в ОИВТ РАН и в МЭИ. При высокой плотности теплового потока через паровую пленку, отделяющую металлическую стенку от недогретой жидкости, на межфазной поверхности не выполняется традиционно используемое условие совместности для плотности потока энергии, согласно которому эта величина равна произведению плотности потока массы на теплоту испарения. Теоретический анализ переноса энергии с учетом эффектов неравновесности на межфазной поверхности успешно выполнен для ряда конкретных условий учеными МЭИ [13].

В научной группе Ивочкина Ю.П. [14–16] были проведены эксперименты по изучению процесса перехода от пленочного кипения к пузырьковому применительно к явлению парового взрыва. Методика проведения эксперимента заключалась в охлаждении предварительно нагретого рабочего участка в объеме с водой. Начальная температура рабочего участка достигала 700°C . Температура воды изменялась от 15 до 95°C . Процесс схода паровой пленки наблюдался визуально и сопровождался синхронным измерением температуры, давления, звуковых эффектов, толщины пленки пара и регистрацией соприкосновения жидкости с горячей поверхностью кондуктометрическим методом. Исследователи установили, что имеются различия в характере схода паровой пленки при высоких и низких температурах воды. Граничная температура, отделяющая взрывное вскипание жидкости от спокойного, равнялась 80°C , что соответствует данным других авторов. Кроме того, был обнаружен режим со стабильными колебаниями паровой пленки, который не приводил к взрывному сходу пленки. Температурная область возникновения таких колебаний близка к верхней границе зоны фрагментации капель жидкого олова, другими словами маломасштабного парового взрыва. Темп охлаждения центра полусферы в режиме взрывного вскипания жидкости составлял 300 K/s , что в три раза быстрее, чем при “спокойном” сходе паровой пленки. Подтвердилось, что режим схода паровой пленки зависит от температуры охлаждающей жидкости.

Было выявлено влияние растворенных газов и примесей на поверхности. Они уменьшают стабильность паровой пленки и способствуют более быстрому ее разрушению. В условиях резкой смены режимов кипения фиксировались одиночные импульсы давления с амплитудой до 1 МПа , которые могут служить триггером для возникновения спонтанного парового взрыва. Эти же авторы в статье [15] высказали предположение об отсутствии фрагментации горячих капель при малых недогревах охладителя: “Можно предполагать, что отсутствие тонкой фрагментации горячих капель и парового взрыва при малых недогревах холодного теплоносителя может быть обусловлено увеличением толщины парового слоя, вызванного интенсификацией испарения с поверхности раздела”.

В [17] представлены экспериментальные и теоретические результаты исследований теплообмена при пленочном кипении недогретой воды в условиях вынужденного течения. Для случая турбулентного закрученного течения недогретой жидкости получено теоретическое расчетное соотношение, хорошо описывающее экспериментальные данные авторов и доступные литературные данные [18]. Отметим, что пленочное кипение недогретой жидкости в характерных для закалки условиях отличается от условий, приведенных в работе [17]. Главное отличие состоит в том, что при охлаждении высокотемпературных тел в недогретой воде процесс пленочного кипения является нестационарным, при этом на его развитие влияют теплофизические свойства поверхности, способность аккумулировать и отдавать тепло.

В течение последнего десятилетия на кафедре инженерной теплофизики МЭИ проводятся экспериментальные исследования, посвященные изучению режима интенсивного охлаждения недогретых жидкостей. Проведена серия экспериментов по охлаждению высокотемпературных шаров из нержавеющей стали, никеля и меди в воде при температуре от 10 до 120°C при давлениях от 0.1 до 1.0 МПа . Экспериментальные данные о теплообмене при охлаждении металлических шаров в недогретой воде подтвердили существование режимов чрезвычайно интенсивного отвода тепла от поверхности, нагретой до температуры, существенно превосходящей критическую для охлаждающей жидкости, т.е. при пленочном кипении [19–35]. Впервые показано, что в режимах интенсивного охлаждения процесс перестает быть сферически симметричным, фронт охлаждения с характерной плотностью теплового потока на уровне $3\text{--}10\text{ МВт/м}^2$ перемещается по поверхности шара снизу вверх, а иногда и в совершенно случайных направлениях. Возникновение интенсивного режима пленочного кипения воды обнаружено для всех материалов и при всех давлениях. Необходимое условие — наличие недогрева воды

(~25 К для атмосферного давления). Выявлено сильное влияние свойств поверхности образца на характер пленочного кипения, с уменьшением коэффициента теплопроводности поверхности увеличивается температура поверхности и тепловой поток q , при которых наступает режим интенсивного охлаждения. Это подтверждается и независимыми исследованиями, проводимыми в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе [36–39].

Было исследовано нестационарное охлаждение высокотемпературных тел в неводных жидкостях [23–25, 27, 29, 30]. Эксперименты, проведенные на изопропанол, этаноле и перфторгексане, продемонстрировали отсутствие интенсивного режима охлаждения в широком диапазоне недогревов (до 170 К) и давлений (до 1.0 МПа). На основе экспериментальных результатов получено приближенное уравнение теплообмена при устойчивом пленочном кипении недогретой жидкости [23]. В расчетной модели учитывается свободная конвекция в жидкости на границе с паровой пленкой. Уравнение обнаруживает хорошее согласие с экспериментальными данными авторов для трех неводных жидкостей при всех возможных недогревах и давлениях до 1.0 МПа.

Анализ всей совокупности экспериментальных данных позволил предложить приближенную модель возникновения интенсивного режима охлаждения недогретых жидкостей [32, 33]. Предполагается, что благодаря волновому движению межфазной границы возникают контакты жидкости и элементов поверхности шероховатости. Они могут привести к быстрому распространению смоченной зоны в зависимости от соотношения теплофизических свойств жидкости и металла. Конечно, надежно зафиксировать такие контакты с помощью классической высокоскоростной видеосъемки невозможно [40]. Хотя видеосъемка, синхронизированная с температурными измерениями, позволяет получить некоторую полезную информацию, например, зафиксировать наличие пленочного кипения в момент погружения раскаленного образца в жидкость [41]. В недавней работе [42] представлены результаты измерения динамики паровой пленки при нестационарном охлаждении шаров из нержавеющей стали в воде с помощью высокоскоростной съемки в спектре рентгеновского излучения. Выявлены два ключевых механизма, управляющие разрушением паровой пленки: неустойчивость межфазной границы и случайные контакты жидкости с твердой поверхностью.

Применительно к задачам настоящей работы важно, что модель [33] предсказывает зависимость температуры начала интенсивного охлаждения от теплоты парообразования, поверхностного натяжения и вязкости жидкости, что подтверждается экспериментами авторов статьи.

В работах других исследователей акцент делается на влияние свойств поверхности охлаждаемого тела. Исследования, посвященные охлаждению в наножидкостях и в морской воде, в конечном счете отражают эффект отложений и роста на теплоотдающей поверхности кристаллов [43, 44]. Выяснить влияние свойств охлаждающей жидкости (поверхностного натяжения) удалось японским исследователям [45]: добавление в воду поверхностно-активных веществ приводило к существенному снижению температуры, при которой начинается интенсивное охлаждение. Этот результат качественно подтверждает модель [33].

Использование в настоящей работе в качестве охлаждающей жидкости бинарных смесей воды и изопропанола различного состава позволяет получать жидкости с заданными свойствами в границах, определяемых свойствами чистых компонентов. Насколько известно авторам, в доступной научной литературе отсутствуют работы по нестационарному пленочному кипению недогретых смесей, если не считать [29]. Заполнить этот пробел – цель данной работы.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Эксперименты проводились на опытном стенде “Режимы охлаждения высокотемпературных поверхностей”, созданном в 2013 г. по программе развития материальной базы НИУ “МЭИ”. Стенд рассчитан на проведение экспериментов в интервале давлений от атмосферного до 1 МПа и температур охлаждающей жидкости от –200 до 200°C. Схема стенда представлена на рис. 1. Герметичный корпус экспериментальной камеры 6 выполнен из нержавеющей стальной трубы внешним диаметром 219 мм с толщиной стенки 10 мм. В его верхней части размещена медная катушка 2 внутренним диаметром 50 мм ВЧ индукционного нагревателя 3. В нижнюю часть стенда заливается охлаждающая жидкость, температура которой поддерживается на заданном уровне с помощью термостата 8 и связанного с ним погруженного в жидкость змеевика 7. Зона нагрева отделена от объема жидкости тонкой металлической диафрагмой 5, экранирующей охлаждающую среду от теплового излучения и брызг охлаждающей жидкости. Металлический шар 1 в начале эксперимента посредством системы перемещения 4 устанавливается внутри катушки 2. Нагрев контролируется с помощью размещенных внутри шара термопар. Предусмотрена возможность проведения нагрева рабочего образца в среде инертного газа, поступающего из баллона 9.

Нагретый шар перемещается в объем охлаждающей жидкости. Во время охлаждения сигнал от термопар 11 поступает через коннектор NI SCXI-

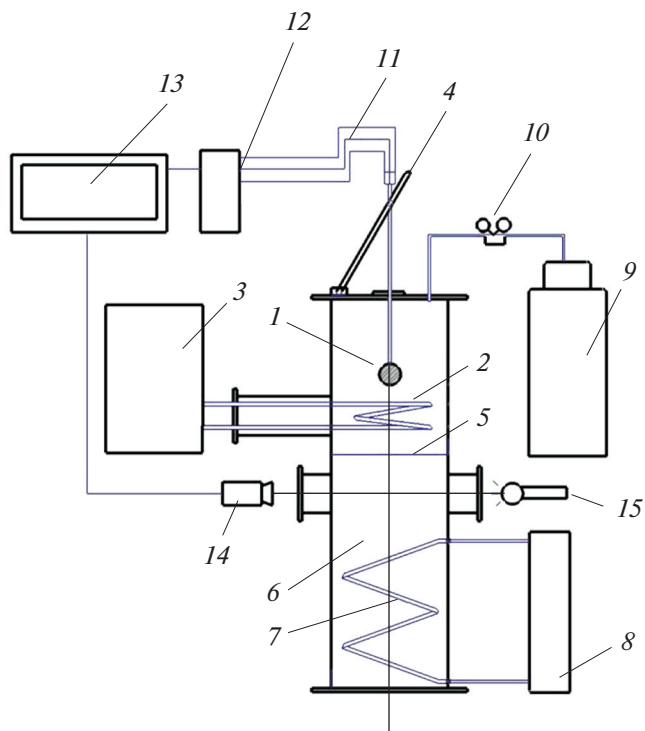


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – рабочий участок, 2 – катушка индуктора, 3 – ВЧ-индуктор, 4 – механизм перемещения рабочего образца, 5 – диафрагма, 6 – экспериментальная камера, 7 – спираль теплообменника, 8 – термостат с циркуляционным контуром, 9 – баллон со сжатым инертным газом, 10 – редуктор и манометр, 11 – термопары рабочего образца, 12 – измерительный модуль, 13 – персональный компьютер, 14 – скоростная цифровая видеокамера, 15 – система освещения.

1303 на измерительный модуль NI SCXI-1102 12, который является частью сборки на основе NI SCXI-1001. Регистрация сигнала от каждой термопары осуществляется с частотой 100 Гц. Ре-

зультаты измерений через USB-интерфейс поступают на персональный компьютер 13, где в программе LabView строится зависимость температуры от времени. В качестве рабочего участка использовался никелевый шар диаметром 30 мм. Схема закладки термопар представлена на рис. 2. Через каналы диаметром 1 мм протягивались кабельные хромель-алюмелевые термопары: четыре на поверхность в точки с полярным углом $\theta = 45^\circ$, 90° , 135° и 180° и одна в центр шара. Спаи термопары приваривались к тонкому (до 100 мкм) никелевому диску диаметром чуть более диаметра самого отверстия. Затем этот диск приваривался заподлицо с поверхностью шара. В процессе экспериментов из-за высоких термоциклических нагрузок одна или две термопары могли выйти из строя, однако оставшиеся термопары обычно позволяли продолжать эксперименты без замены образца.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении. В качестве охлаждающей жидкости использовались дистиллированная вода и химически чистый изопропиловый спирт (99%), а также их смеси различных концентраций. Эксперименты на насыщенном изопропанол не проводились из соображений пожаробезопасности. Из фазовой диаграммы смеси вода–изопропанол (рис. 3) видно, что для большого диапазона концентраций температура насыщения для смеси остается практически на одном уровне. Поэтому эксперименты, проведенные при температуре смеси 30°C , соответствуют примерно одному значению недогрева при различных концентрациях изопропанола в смеси. Для определения концентрации изопропилового спирта в водном растворе использовался ареометр постоянной массы.

Начальная температура шара в экспериментах с водой составляла около 700°C , а для изопропа-

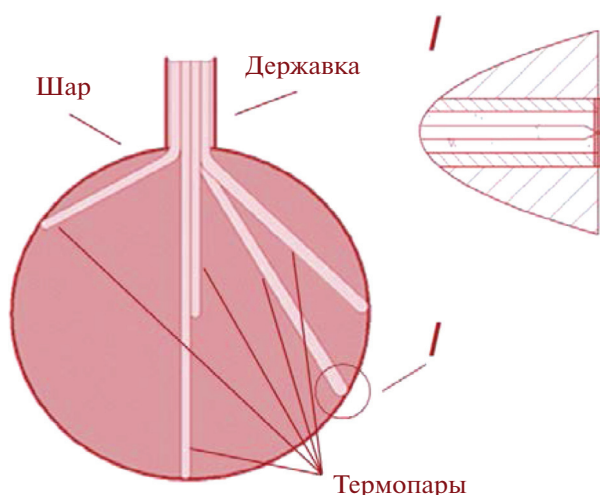


Рис. 2. Конструктивная схема рабочего участка.

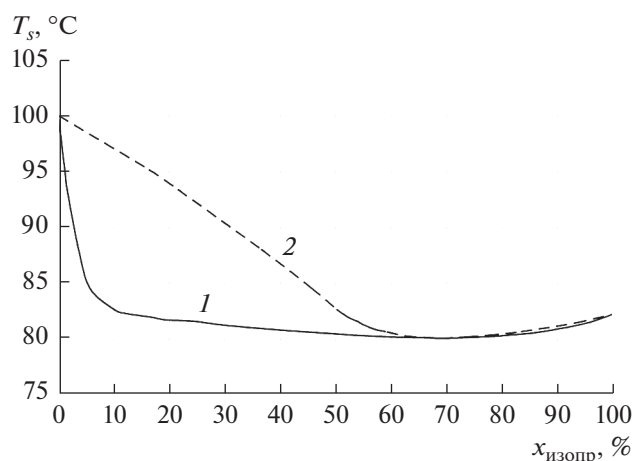


Рис. 3. Фазовая диаграмма бинарной смеси изопропанол–вода: 1 – кривая испарения, 2 – кривая конденсации.

нола не превышала 420°C . Это обусловлено тем, что температура самовозгорания изопропанола равна 451°C . При охлаждении шара в смеси вода–изопропанол начальная температура шара была на уровне $400\text{--}550^{\circ}\text{C}$. Отметим, что при многократном нагреве до высокой температуры на воздухе на шаре образовывался устойчивый оксидный слой характерного зеленого цвета. Учитывая, что теплофизические свойства оксидного слоя отличаются от чистого никеля, необходимо принимать это во внимание при анализе экспериментальных результатов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В [29–35] были представлены результаты по охлаждению никелевого, медного и нержавеющей шаров диаметром от 30 до 45 мм в различных жидкостях. Характер охлаждения горячего тела в недогретом изопропаноле (так же как в этаноле и перфторгексане) качественно отличается от охлаждения в воде при ее недогреве более 22 К. Это видно из термограмм охлаждения, представленных на рис. 4. Из рис. 4а ясно, что большая часть времени охлаждения в изопропаноле (около 2 мин) приходится на режим устойчивого пленочного кипения, который сменяется переходным, а затем пузырьковым при снижении температуры поверхности приблизительно до 170°C . При охлаждении в воде (рис. 4б) интенсивный режим теплообмена начинается практически сразу после погружения шара в объем жидкости, когда температура поверхности равна 700°C , что намного выше критической температуры для воды. Время охлаждения шара в воде значительно меньше, чем в спирте. При этом недогрев изопропанола $\Delta T_{\text{sub}} = 97\text{ К}$ почти в 1.5 раза выше, чем для воды $\Delta T_{\text{sub}} = 70\text{ К}$. Недогрев, достаточный для возникновения высокоинтенсивного пленочного режима кипения в воде, составляет 22 К, а это значит, что в этом эксперименте недогрев спирта больше почти в пять раз. Тем не менее весь процесс качественно аналогичен охлаждению в насыщенной жидкости и не обнаруживает режима интенсивного теплообмена, который наблюдается при пленочном кипении недогретой воды. На рис. 5 представлены зависимости усредненной по поверхности температуры шара (по показаниям трех термопар) от времени при различных концентрациях изопропанола в смеси (20, 40, 50, 60, 80 и 100%). Из графика видно, что при высоких содержаниях спирта смесь кипит на поверхности образца качественно так же, как если бы воды не было вовсе. С падением содержания изопропанола в смеси растет температура начала интенсивного охлаждения. Из-за этого общее время охлаждения уменьшается. Важно, что даже при

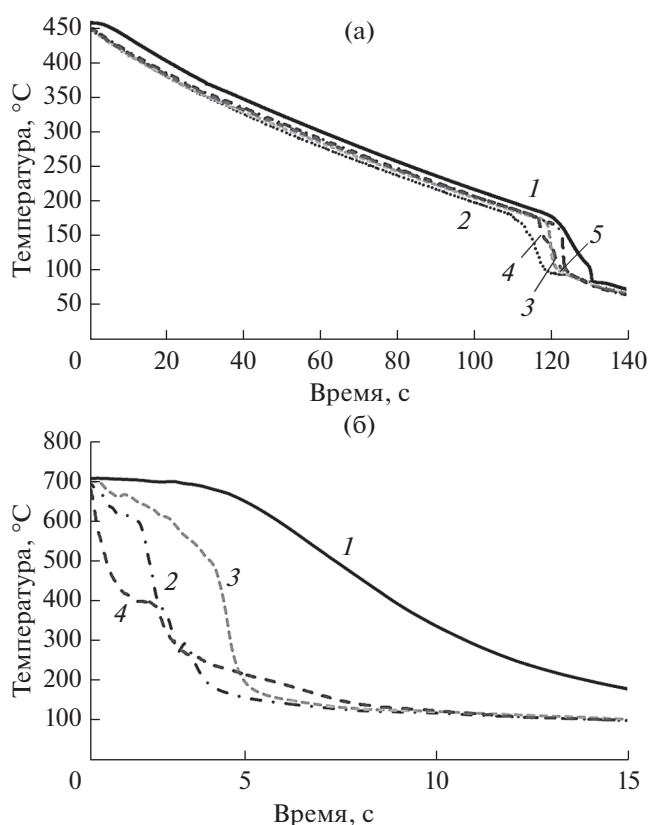


Рис. 4. Типичные термограммы охлаждения 45 мм никелевого шара в жидкостях, недогретых до температуры насыщения: (а) – изопропиловый спирт ($\Delta T_{\text{sub}} = 97\text{ К}$); (б) – вода ($\Delta T_{\text{sub}} = 70\text{ К}$); 1 – центр шара, 2 – $\theta = 180^{\circ}$, 3 – 135° , 4 – 90° , 5 – 45° .

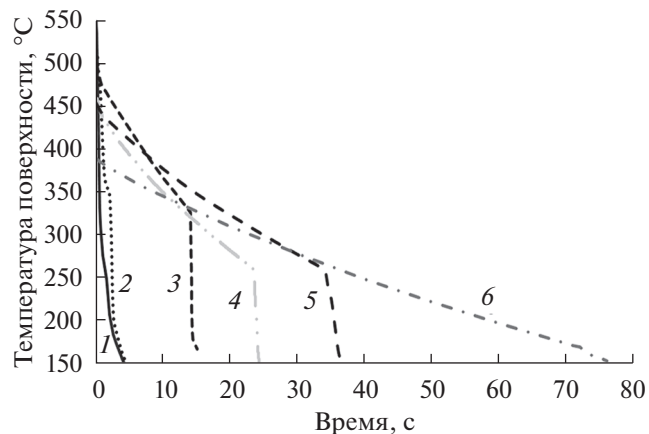


Рис. 5. Зависимость усредненной по поверхности температуры от времени при различных концентрациях изопропанола в смеси при охлаждении никелевого шара диаметром 30 мм: 1 – 20%, 2 – 40, 3 – 50, 4 – 60, 5 – 80, 6 – 100.

незначительном содержании воды теплообмен при пленочном кипении интенсивнее, чем в чистом изопропаноле, т.е. характеризуется более высоким коэффициентом теплоотдачи. Так, в чистом изопропаноле шар охлаждается от началь-

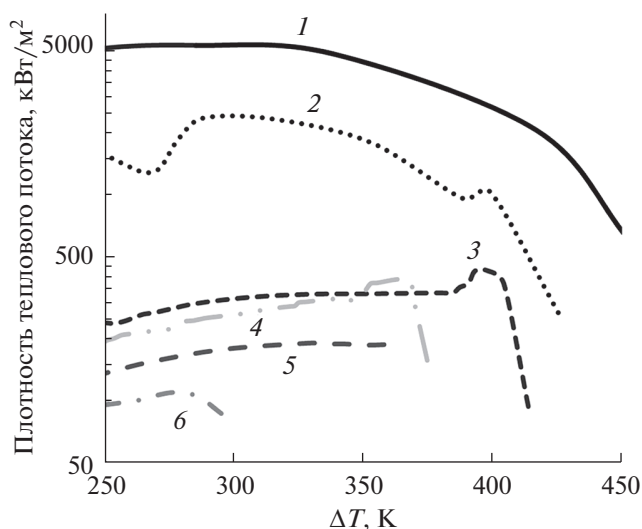


Рис. 6. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора для разных концентраций изопропанола в воде (температурный напор соответствует температурам поверхности, когда продолжительный контакт жидкости со стенкой невозможен): 1–6 — то же, что на рис. 5.

ной температуры 390 до 150°С за 76 с, в то время как добавление всего 20% по массе воды сокращает время охлаждения в два раза (причем начальная температура шара на 60 К выше). Для высокого содержания изопропанола (выше 50%) интенсивное охлаждение начиналось только при температуре поверхности, соответствующей началу переходного кипения. При концентрации изопропанола менее 50% в единичных реализациях появляются режимы интенсивного охлаждения в условиях, когда температура стенки превышает температуру перегрева смеси, т.е. при пленочном кипении недогретой жидкости. Кривая 3 на рис. 5 демонстрирует разрушение пленки и переход к интенсивному охлаждению при температуре поверхности 320°С, что превышает T_{lim} даже для однокомпонентной воды. Таким образом, область концентраций в окрестности 50% можно считать граничной для возникновения режима интенсивного охлаждения в режиме пленочного кипения недогретой смеси вода–изопропанол. Последующее увеличение концентрации воды сильнее “съедает” участок пленочного кипения, и тем отчетливее становится участок интенсивного “микробульбового” кипения. С определенной долей уверенности можно сказать, что граница перехода к интенсивному процессу кипения при температуре смеси 30°С лежит в пределах концентрации изопропилового спирта 40–50%. Для концентраций спирта в воде <40% процесс заковки происходит практически мгновенно и характеризуется огромными темпа-

ми охлаждения. Участок устойчивого пленочного кипения для данных концентраций не наблюдался.

По осредненным термограммам была численно решена одномерная обратная задача теплопроводности (ОЗТ) на участке, когда температура поверхности исключала прямой продолжительный контакт с жидкостью ($\Delta T > 250$ К), т.е. в области пленочного кипения. Результаты расчета нанесены на график в полулогарифмических координатах “плотность теплового потока — температурный напор”. На рис. 6 цифрами 3–6 (50, 60, 80 и 100%) обозначены кривые плотностей теплового потока, соответствующие режимам устойчивого пленочного кипения с низкой интенсивностью теплообмена. В таких режимах сферическая симметрия полей температуры сохраняется практически на всем участке охлаждения. Тогда показания температур в разных точках поверхности шара при фиксированных временах практически совпадают, а отличие от температуры в центре мало. При этих условиях использование осредненной температуры поверхности для решения одномерной ОЗТ более чем оправданно [6]. В результате были получены значения плотности теплового потока, типичные для пленочного кипения насыщенных жидкостей. Для чистого изопропилового спирта среднее значение плотности теплового потока не превышало 100 кВт/м². С ростом содержания воды это значение увеличивалось, достигая максимума в 400 кВт/м² при концентрации в 50%.

Дальнейший рост содержания воды в смеси характеризовался наличием фронта интенсивного охлаждения и неоднородностью температур по поверхности шара. При таких условиях охлаждения осреднение поверхностных термограмм для последующего решения одномерной ОЗТ представляется наиболее разумным способом анализа экспериментальных результатов. Это обеспечивает существенно более реалистичную информацию о процессе охлаждения в сравнении с экспериментами, где температура регистрируется только в одной точке. Прямое сравнение показывает, что плотности теплового потока, рассчитанные методом сосредоточенной теплоемкости в режиме интенсивного охлаждения, практически в два раза ниже результатов, полученных решением одномерной ОЗТ на основе осредненной температуры поверхности. Для содержания спирта в смеси 40 и 20% решение ОЗТ дает необычайно высокие значения q , превосходящие критические тепловые потоки при кипении воды. При 40%-ной концентрации спирта значения q достигали 2500 кВт/м², а при 20% — 5000 кВт/м². Эти значения на порядок превосходят величины плотности теплового потока при концентрациях спирта в смеси более 50%. Причина столь больших различий режимов охлаждения — различия свойств жидкости. В дан-

ном случае с ростом массовой доли воды сильнее всего изменяется теплота парообразования.

Таким образом, эксперименты подтвердили предположение о том, что в растворе должна существовать граничная концентрация, разделяющая области с различными механизмами пленочного кипения недогретой жидкости. Скоростная видеосъемка зафиксировала возникновение участков с микропузырьками в окрестности вероятного фронта быстрого охлаждения, определяемого температурными измерениями. Первые серии экспериментов обнаруживали эти участки вблизи нижней точки шара, что наблюдалось в прежних экспериментах с шаром диаметром 45 мм. После многократных повторений нагрева и быстрого охлаждения шара в месте заделки поверхностной термопары с координатой 45° по полярному углу возник небольшой поверхностный дефект, который в ряде последующих опытов инициировал начало интенсивного охлаждения на верхней части поверхности. Этот факт, зафиксированный и температурными измерениями, и видеосъемкой, показывает, что состояние охлаждаемой поверхности также существенно влияет на режим теплообмена. Ясно, что заделка термопары на поверхности детали с выводом электродов непосредственно через объем жидкости, использованная в некоторых исследованиях процесса закалки, сильно влияет на изучаемый процесс.

Как видно из полученных экспериментальных данных, температура поверхности, при которой начинается режим интенсивного охлаждения, превышает не только температуру спинодали, но и критическую температуру жидкости. При этом устойчивое пленочное кипение сменяется “микропузырьковым” и характеризуется высокими значениями отводимых тепловых потоков. Согласно модели, представленной в [33], в случае контакта гребней волн с выступами поверхностной шероховатости возникают чрезвычайно высокие плотности теплового потока вблизи линии контакта трех фаз. При средней температуре поверхности тела, существенно превышающей критическую температуру жидкости, выступы шероховатости при периодическом приближении к ним гребня волны жидкости будут охлаждаться через очень тонкую паровую пленку и могут охладиться до температуры ниже температуры предельного перегрева жидкости. В этом случае контакт жидкость–твердое тело термодинамически возможен. При таком контакте интенсивному теплоотводу из-за испарения пленки жидкости в окрестности линии контакта трех фаз противостоит тепловодный поток с нестационарной теплопроводностью из объема горячего тела. Анализ [33] подтвержден в отношении влияния свойств жидкости и коэффициента тепловой активности охлаждаемого металла. Однако в модели учет свободной конвекции недогретой жидкости на гра-

нице с паровой пленкой не дает правильной оценки влияния недогрева на условия перехода к режиму интенсивного теплообмена; кроме того, в ней не учитывается шероховатость охлаждающей поверхности. В настоящее время идет корректировка модели [46]. Получена общая форма уравнения для перегрева поверхности, соответствующего началу режима интенсивного теплообмена:

$$T_{wtr} - T_{lim} = C \sqrt{\frac{\rho_l \lambda (T_{lim} - T_s) H_{LG}}{(\rho C \lambda)_w}} \times \left(R_z \frac{H_{LG}}{\lambda_v (T_{wtr} - T_s)} \sqrt{\frac{\rho_l \rho_v g \beta \Delta T_{sub} D}{Pr}} \right), \quad (1)$$

где T_{wtr} – температура поверхности, при которой начинается интенсивный режим охлаждения; T_{lim} – температура предельного перегрева жидкости; ρ – плотность; λ – теплопроводность; H_{LG} – теплота парообразования; C – теплоемкость; R_z – средняя высота неровностей поверхности; β – коэффициент термического расширения жидкости; ΔT_{sub} – недогрев до температуры насыщения T_s ; Pr – число Прандтля; D – диаметр шара. Индекс l относится к жидкой фазе, v – к газовой и w – к твердому телу.

На рис. 7 приводится сопоставление результатов расчета согласно (1) с опытными данными настоящей работы при $C = 8.8$; R_z принималась равной 10 мкм. По оси ординат отложена разность температур $T_{wtr} - T_s$, а по оси абсцисс – концентрация изопропилового спирта в воде. Из графика видно удовлетворительное согласие экспериментальных данных с расчетной кривой, при этом наилучшее согласие наблюдается в диапазоне концентраций 0.2–0.7. Переход к интенсивному режиму охлаждения подвержен влиянию многих факторов, что вообще характерно для кипения; закономерности процесса проявляются статисти-

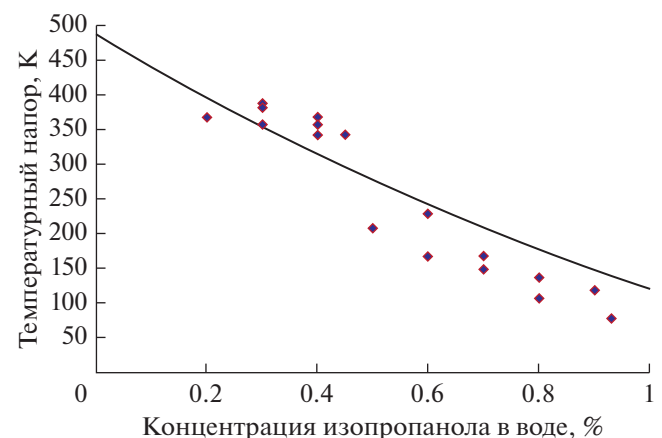


Рис. 7. Сравнение предсказанной моделью (1) температуры начала интенсивного охлаждения (сплошная линия) с экспериментальными данными (точки).

чески. Стоит также отметить, что формула (1) предсказывает не только переход к режиму микропузырькового кипения, когда температура перехода T_{wtr} намного превышает критическую для жидкости, но и менее “драматичный” переход от пленочного кипения к переходному при высоких концентрациях изопропанола в смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Представлены результаты экспериментального исследования охлаждения никелевого шара, нагретого до температур 400–550°C, в бинарной смеси вода–изопропиловый спирт с различной концентрацией изопропанола (20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 93.3%). Проанализированы закономерности распределения температуры внутри образца в различных режимах охлаждения.

- При массовых концентрациях спирта от 90 до 60% процесс охлаждения качественно не отличался от охлаждения в чистом изопропаноле. Однако выявлено увеличение температуры поверхности, при которой начинается переходное кипение, хотя в режиме устойчивого пленочного кипения при увеличении массовой доли воды в растворе скорость охлаждения возрастает незначительно (с 5 до 8 К/с).

- При уменьшении концентрации изопропанола до 50% и менее наблюдаются характерные для охлаждения в недогретой воде режимы интенсивного теплообмена при пленочном кипении; в 4 реализациях из 11 такие режимы начинались при температуре поверхности 400–425°C, а в остальных – при температуре 315–360°C. Характерная скорость охлаждения в этих режимах составляла 500–700 К/с.

- Дальнейшее увеличение массовой доли воды в растворе вело к повышению температуры поверхности, отвечающей началу режима интенсивного охлаждения; в растворе с 20%-ным содержанием изопропанола такие режимы возникали практически мгновенно после погружения в жидкость шара с начальной температурой 550°C.

- В рамках решения ОЗТ определены плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи в процессе охлаждения шара диаметром 30 мм в смеси с различным содержанием изопропилового спирта. При массовой доле спирта в растворе 20 и 40% расчетные значения теплового потока в режиме интенсивного теплообмена составляют 5 и 2.5 МВт/м² соответственно.

- Температура начала интенсивного режима охлаждения удовлетворительно предсказывается с помощью приближенной модели, разработанной авторами [33].

Работа выполнена на кафедре инженерной теплофизики им. В.А Кириллина НИУ “МЭИ” за

счет гранта Российского научного фонда (проект № 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. *Лабунцов Д.А., Гомелаури А.В.* Теплообмен при пленочном кипении криогенных и обычных жидкостей на вертикальных поверхностях // *Тр. МЭИ.* 1976. Вып. 310. С. 41.
3. *Frederking T.H.K., Clark J.A.* Natural Convection Film Boiling on a Sphere // *Adv. Cryog. Eng.* 1963. V. 8. P. 501.
4. *Аметистов Е.В., Клименко В.В., Павлов Ю.М.* Кипение криогенных жидкостей / Под ред. Григорьева В.А. М.: Энергоатомиздат, 1995. 400 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. *Zvirin Y., Hewitt G.F., Kenning D.B.R.* Boiling on Free Falling Spheres: Drag and Heat Transfer Coefficients // *Exp. Heat Transfer.* 1990. V. 3. № 3. P. 185.
7. *Corell S.J., Kenning D.B.R., Hewitt G.F.* Film Boiling on a Molten Brass Sphere in Flowing Water // *UK Nat. Conf. on Heat Transfer. Glasgow.* 1988. P. 1557.
8. *Yagov V.V., Zabirow 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.
9. *Suzuki K.* Microbubble Emission and High Heat Flux Observed in Subcooled Boiling // *ECI Int. Conf. on Boiling Heat Transfer. Spoleto, Italy.* 2006.
10. *Ando J., Horiuchi K., Saiki T., Kaneko T., Ueno I.* Transition Process Leading to Microbubble Emission Boiling on Horizontal Circular Heated Surface in Subcooled Pool // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2016. V. 101. P. 240.
11. *Sher I., Harari R., Reshef R., Sher E.* Film Boiling Collapse in Solid Spheres Immersed in a Sub-cooled Liquid // *Appl. Therm. Eng.* 2016. V. 36. P. 219.
12. *Gyls J., Skvorcinskiene R., Paukstaitis L., Gyls M., Adomavicius A.* Film Boiling Influence on the Spherical Body's Cooling in Subcooled Water // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2016. V. 95. P. 709.
13. *Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Крюков А.П., Пузина Ю.Ю.* Пленочное и переходное кипение недогретой воды на сферических поверхностях // *Минский междунац. форум по теплообмену. Тез. докл. Минск: ИТМО НАНБ им. А.В. Лыкова, 2016. Т. 1. С. 335.*
14. *Крюков А.П., Пузина Ю.Ю.* Определение толщины паровой пленки в задаче о пленочном кипении недогретой жидкости // *Тр. V Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. Т. 4. С. 100.*
15. *Ивочкин Ю.П., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А., Кубриков К.Г.* К вопросу об отсутствии фрагментации горячих капель при малых недогревах охладителя // *Теплофизика и аэромеханика.* 2012. Т. 19. № 4. С. 475.
16. *Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Оксман А.А., Белов К.И.* Экспериментальное исследование характеристик взрывного вскипания недо-

- гретой воды на горячей поверхности при смене режимов кипения // ТВТ. 2009. № 6. Т. 47. С. 891.
17. *Ягов В.В., Дедов А.В.* Теплообмен при пленочном кипении в турбулентном потоке недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 2009. № 3. С. 21.
 18. *Chen S., Xiao Y., Gu H.* Experimental Study on Boiling Heat Transfer in a Three-Rod Bundle at Near-Critical Pressure // Ann. Nucl. Energy. 2019. V. 131. P. 196.
 19. *Lexin M.A., Yagov V.V., Pavlov P.A., Zabiroy A.R.* Experimental Study of Heat Transfer at Cooling of High-Temperature Bodies in Subcooled Liquids // Proc. VI Int. Conf. on Transport Phenomena in Multiphase Systems. Ryn. Poland. 2011. P. 301.
 20. *Yagov V.V.* Mechanisms of Intensive Heat Transfer for Different Modes of Boiling // Heat Pipes and Solid Sorption Transformations. Fundamentals and Practical Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. P. 109.
 21. *Yagov V.V., Zabiroy A.R., Lexin M.A.* Unsteady Heat Transfer During Subcooled Film Boiling // Therm. Eng. 2015. V. 62. № 11. P. 833.
 22. *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.
 23. *Yagov V.V., Zabiroy A.R., Kanin P.K., Denisov M.A.* Heat Transfer in Film Boiling of Subcooled Liquids: New Experimental Results and Computational Equations // J. Eng. Phys. Thermophys. 2017. V. 90. № 2. P. 266.
 24. *Zabiroy A.R., Yagov V.V., Kaban'kov O.N., Lexin M.A., Kanin P.K.* Pressure Influence on Steady Film Boiling of Subcooled Liquids // J. Eng. Phys. Thermophys. 2016. V. 89. P. 1466.
 25. *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. 917.
 26. *Ягов В.В.* Кипение жидкостей: основные направления научных исследований (по материалам ИНТС-16 и РНКТ-7) // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 16.
 27. *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.
 28. *Zabiroy A.R., Kanin P.K., Vinogradov M.M., Sliva A.P., Dedov A.V., Fedorovich S.D., Yagov V. V.* Influence of Carbon Coating and Oxide Layer on Film Boiling Regime // Mater. Today: Proc. 2018. V. 5. № 12. P. 26171.
 29. *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. 012029.
 30. *Zabiroy A.R., Kanin P.K., Vinogradov M.M., Sharafutdinov A.M.* Factors Affecting Quenching in Cryogenic Liquids // J. Phys.: Conf. Series. 2018. V. 1128. 012015.
 31. *Zabiroy A.R., Yagov V.V., Lexin M.A., Kanin P.K.* Method of Restoring Boundary Conditions on the High-Temperature Sphere Surface During its Cooling // J. Phys.: Conf. Series. 2018. V. 1128. 012095.
 32. *Yagov V.V., Zabiroy A.R., Kanin P.K., Lexin M.A.* An Approximate Model of Incipience of Highly Intensive Film Boiling Regime in Subcooled Liquids // Int. Heat Transfer Conf. Digital Library. Begel House Inc. 2018. P. 713.
 33. *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. P. 823.
 34. *Дедов А.В., Забиroy А.Р., Слива А.П., Федорович С.Д., Ягов В.В.* Влияние углеродистого покрытия поверхности на теплообмен при нестационарном пленочном кипении // ТВТ. 2019. Т. 57. № 1. С. 72.
 35. *Zabiroy A.R., Smirnova A.A., Feofilaktova Yu.M., Shevchenko S.A., Yashnikov D.A.* Russian Experimental Database for Validation of Computer Codes Used for Safety Analysis of Nuclear Facilities // Prog. Nucl. Energy. 2020. V. 118. 103061.
 36. *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.
 37. *Павленко А.Н., Цой А.Н., Суртаев А.С., Кузнецов Д.В., Калита В.И., Комлев Д.И., Иванников А.Ю., Радюк А.А.* Экспериментальное исследование повторного смачивания перегретой пластины со структурированным капиллярно-пористым покрытием стекающей пленкой жидкости // ТВТ. 2018. Т. 56. № 3. С. 424.
 38. *Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V.* Experimental Study of the Effect of Structured Capillary-Porous Coating on Rewetting Dynamics and Heat Transfer at Film Cooling by Liquid Nitrogen // J. Phys.: Conf. Series. 2018. V. 1105. 012053.
 39. *Starodubtseva I.P., Pavlenko A.N., Surtaev A.S.* Heat Transfer During Quenching of High Temperature Surface by the Falling Cryogenic Liquid Film // Int. J. Thermal Sci. 2017. V. 114. № 4. P. 196.
 40. *Kenning D.B.R.* Optical Studies of Boiling Heat Transfer: Insights and Limitations // Int. J. Heat Fluid Flow. 2004. V. 25. № 2. P. 209.
 41. *Beck M., Neise C., Ahrenberg M., Schick C., Kragl U., Kessler O.* Heat Transfer Mechanisms Analysed by High Speed Video Recording of Metal Quenching in Ionic Liquids and Water // Int. J. Microstruct. Mater. Prop. 2016. V. 11. № 5. P. 359.
 42. *Jones P.R., Chuang C., Sun T., Zhao T.Y., Fezzaa K., Takase J.C., Singh D., Patankar N.A.* High-Speed X-Ray Imaging of the Leidenfrost Collapse // Sci. Rep. 2019. V. 9. № 1. P. 1598.
 43. *Seung S.W., Seong M.K., Seong D.P., In C.B.* Study on the Cooling Performance of Sea Salt Solution During Reflood Heat Transfer in a Long Vertical Tube // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 60. P. 105.
 44. *Kim H., DeWitt G., McKrell T., Buongiorno J., Hu L.* 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. № 5. P. 427.
 45. *Furuya M., Arai T.* Prescription for Use of Vapor Explosion Retardant into Salt Water // Proc. 16th Int. Heat Transfer Conf. IHTC16. 2018. 23614.
 46. *Zabiroy A.R., Yagov V.V., Kanin P.K., Lexin M.A.* Heat Transfer in Quenching Process // Proc. 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conf. Maui, Hawaii, USA. 2019. P. 1.