

Экспериментальное исследование процессов охлаждения высокотемпературных цилиндрических тел в жидкостях

И. А. Молотова, А. Р. Забиров, И. А. Беляев и И. М. Рознин

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

E-mail: irina_molotova1705@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 июля 2020 г.

Аннотация. В работе рассматриваются экспериментальные результаты, полученные при охлаждении в жидкостях высокотемпературных цилиндрических образцов с различной теплопроводностью. Эксперименты проводились при атмосферном давлении в воде и этаноле в широком диапазоне недогревов до температуры насыщения. Для образцов с низкой тепловой активностью металла экспериментально зафиксирован рост температуры перехода к интенсивному режиму охлаждения, сопровождающийся значительным увеличением отводимых тепловых потоков. С использованием программного комплекса ANSYS получены распределения температурных полей внутри цилиндров в различные моменты времени охлаждения. Проведен сравнительный анализ процессов охлаждения образцов с различными теплофизическими свойствами. <https://doi.org/10.33849/2020103>

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс охлаждения высокотемпературных тел в жидкостях является неотъемлемой частью технологических процессов в металлургии, атомной энергетике, криогенной технике и других отраслях промышленности. Во время процесса закалки наблюдаются различные режимы кипения: пленочное, переходное и пузырьковое, при этом каждому режиму соответствуют определенные характеристики теплообмена. Помимо этого, экспериментально подтверждено существование особого режима теплообмена, так называемого «микропузырькового» кипения, впервые открытого Хьюиттом и Кеннингом [1]. Авторами обнаружено, что при охлаждении высокотемпературных тел в воде с большими недогревами существует особый режим кипения с очень высокой интенсивностью теплообмена. Этот режим наступает при температуре поверхности выше критической для охлаждающей жидкости и характеризуется высокой скоростью охлаждения (до 1000 К/с). Большие температурные градиенты вблизи поверхности теплообмена вызывают напряжения в металле, что обычно приводит к растрескиванию и разрушению образца [2]. Таким образом, изучение «микропузырькового» кипения актуально и для расчета прочности материалов.

В ядерной энергетике во время аварии с потерей теплоносителя (LOCA — loss-of-coolant-accident) топливная оболочка ядерного реактора перегревается. Для недопущения его расплавления, сработает система аварийного охлаждения и активная зона заливается водой. При этом наблюдается взаимодействие высокотемпературного твэла с недогретой водой, и достоверное определение условий смены режимов кипения становится критически важным.

После аварии на АЭС «Фукусима-1» начались крупномасштабные поисковые исследования по созданию нового вида ядерного топлива, толерантного к авариям, для исключения возможности парциркулиевой реакции — термохимической реакции с большим выделением тепла, происходящей при взаимодействии разогретых до высоких температур оболочек твэлов (1200–1400 °С) с парами воды. Предполагается либо использование защитных покрытий на стандартных твэлах, ли-

бо использование новых материалов с полным исключением циркония. Изучение влияния свойств материалов на теплообмен при охлаждении и возможность точного предсказания температуры перехода к интенсивному режиму необходимы для обоснования с позиций теплофизики выбора нового вида толерантного твэла. Материал нового толерантного твэла должен пройти тщательное исследование в условиях реактора. Кроме того, должно быть проанализировано его поведение в случае возникновения аварийных ситуаций.

К материалам, способным проявлять стойкость к высокотемпературному окислению водяным паром, относятся покрытия на основе хрома, оксида алюминия и/или кремния. Следовательно, любая технология покрытия для использования его в качестве толерантного топлива должна содержать по меньшей мере один из этих элементов. Покрытие толерантного твэла должно быть достаточно тонким (менее 20 мкм), чтобы иметь минимальное влияние на сечение поглощения нейтронов и экономию топлива [3]. При этом возникает ряд проблем, характерных для взаимодействия покрытий с основным материалом. Необходимо, чтобы покрытие обладало высокой адгезией и химической устойчивостью к подложке на основе циркония во время эксплуатации и за пределами нормальных условий, защищая его от быстрого окисления в течение периода, превышающего длительность проектной аварии.

Расчетный анализ аварии LOCA показал, что пиковая температура оболочек снижается на 75 К при замене циркаловых оболочек на FeCrAl [4]. Использование более коррозионностойких материалов, чем циркалой, при окислении оболочки может приводить к снижению её температуры на 225 К. В работе [5] трубчатые нагреватели из SiC и циркалоя-4 помещали в насыщенную деионизированную воду. Эксперименты показали увеличение критического теплового потока на 63% для SiC по сравнению с циркалом, что авторы связывают с более высокой теплопроводностью и шероховатостью SiC. Авторы из Кореи при охлаждении в воде окисленных при 1200 °С образцов с хромовым покрытием наблюдали быстрое снижение температуры от 1200 до 60 °С всего за 5 с [6]. Похожие эксперименты, проведенные в СЕА (Франция) [7], показали, что после окисления в образ-

це с хромовым покрытием образуется меньше водорода, чем в образце из циркалоя-4 без покрытия.

Большинство рассмотренных работ направлено на важные, но узкие прикладные вопросы. Между тем, есть ряд более общих проблем охлаждения высокотемпературных тел в жидкостях. Эффект низкотеплопроводных покрытий давно и широко используется в криогенике [8]. Различные исследования показывают, что увеличения интенсивности охлаждения можно добиться изменением состояния поверхности теплообмена. Авторы [9] наблюдали значительный рост скорости охлаждения при закалке медной пластины с нанесенной на нее вакуумной смазкой Рамзая. В исследованиях [10], [11] было изучено влияние низкотеплопроводных и капиллярно-пористых покрытий, изготовленных различными методами, включая метод плазменного напыления, на процесс охлаждения перегретых поверхностей стекающими криогенными плёнками жидкости. При охлаждении перегретых медных пластин с такими типами покрытий наблюдалось смачивание теплоотдающей поверхности при более высоких температурных напорах. В работе [12] обсуждаются результаты, полученные при нестационарном криогенном охлаждении струей жидкого азота круглых каменных и алюминиевых пластин. Результаты эксперимента показали, что после струйного удара поверхность с низкой теплопроводностью и микроструктурной пористостью смачивалась струей жидкого азота, при этом авторы не наблюдали пленочный режим кипения, а температура повторного смачивания каменной плиты была почти на 100 °С выше, чем у алюминиевой поверхности. Для объяснения полученных результатов авторы используют теорию возможности локального прямого контакта жидкости с твердой поверхностью, что может дать объяснение отсутствию пленочного кипения при температурах поверхности выше критической для жидкого азота и увеличению температуры перехода на поверхности образца. В работе [13] представлены экспериментальные результаты по охлаждению сфер из нержавеющей стали (полированные, покрытые инеем и льдом) в жидком аргоне и азоте. Эксперименты на образцах, покрытых инеем, имеющих высокую пористость и низкую тепловую эффективность, продемонстрировали более высокие скорости охлаждения. Хотя при этом достигается выигрыш в скорости охлаждения и экономия криожидкости, плотность теплового потока на поверхности тела обычно много ниже критического теплового потока (КТП) при кипении в объеме. Температура охлаждаемого металла при переходе к интенсивному теплообмену превышает критическую температуру жидкости, но на поверхности покрытия она существенно ниже и определяется хорошо известным соотношением для температуры поверхности двух полуограниченных массивов с различными начальными температурами.

В металлургии важность изучения процессов охлаждения обусловлена необходимостью получения металла с заданными свойствами в результате закалки. Процесс закалки был проанализирован в работе [14], где нагретый до 850 °С зонд Inconel 600 охлаждался в минеральном масле. В ходе экспериментов были получены временные и температурные данные в разных аксиальных и радиальных точках при охлаждении зонда, благодаря чему стало возможным установить, что фронт

смачивания начинается снизу и поднимается вверх, а изменение пиковых тепловых потоков, оцененных в радиальном направлении, указывает на неоднородный характер фронта смачивания.

Однако интенсификация процесса нестационарного пленочного кипения наиболее заметна при использовании воды в качестве охлаждающей жидкости. Именно в этом случае может наблюдаться малоизученный «микропузырьковый» режим кипения. Этот термин авторы использовали для нестационарного пленочного кипения сильно недогретой воды [1]. Указанный режим фиксировался при температурах поверхности более 400 °С, исключающих возможность прямого контакта жидкости со стенкой, и характеризовался образованием вблизи поверхности теплообмена микроскопических пузырьков пара. В этом случае тепловые потоки достигали невероятных для пленочного кипения значений — 5–7 МВт/м². В ОИВТ РАН близкие по содержанию исследования ведутся коллективом [15]. Авторы выполняют комплексные экспериментальные исследования с одновременной регистрацией температуры, импульсов давления и электрических характеристик. В работе подчеркивается, что продолжительность электрических контактов увеличивается вблизи температуры Лейденфроста, что указывает на возможные точечные контакты элементов поверхности с жидкостью.

В исследовании [16] стержни из нержавеющей стали с супергидрофильной поверхностью, созданной нанесением наночастиц кремнезема для увеличения шероховатости, охлаждали в насыщенной и недогретой воде. Авторы также отметили, что фронт закалки распространяется снизу вверх при охлаждении необработанных и супергидрофильных стержней. Было показано, что супергидрофильность поверхности и увеличение недогрева жидкости могут значительно ускорить процесс закалки. Охлаждение в насыщенной воде супергидрофильного образца происходило быстрее, чем необработанного, а с ростом недогрева воды время охлаждения сильно уменьшалось. В [17] представлены результаты экспериментального исследования режимов теплообмена при охлаждении в воде высокотемпературных стальных шаров с гладкой и обработанной поверхностью, на которую было нанесено тонкодисперсное углеродистое покрытие с последующей обработкой электронным пучком. Углеродистое покрытие привело к снижению температуры перехода к режиму интенсивного охлаждения. В работе [18] изучались результаты по охлаждению нагретых металлических шаров из углеродистой и нержавеющей стали в рассолах и водных суспензиях графита и глины. Эксперименты показали, что изменение массовой доли твердых примесей в охлаждающей среде слабо влияет на процесс охлаждения. Также были замечены слабые флуктуации температуры вблизи границы раздела жидкость/пар при пленочном кипении недогретой деионизированной воды, что авторы связывают с явлением «ступенчатого» изменения толщины пленки пара, вызванного кратковременными локальным контактам жидкости и поверхности.

Стоит отметить, что интенсивный режим теплообмена также наблюдался в жидком недогретом натрии [19]. Еще в 1971 году М.М.К. Farahat провел эксперименты по охлаждению высокотемпературных танталовых сфер в недогретом натрии, однако тогда не было

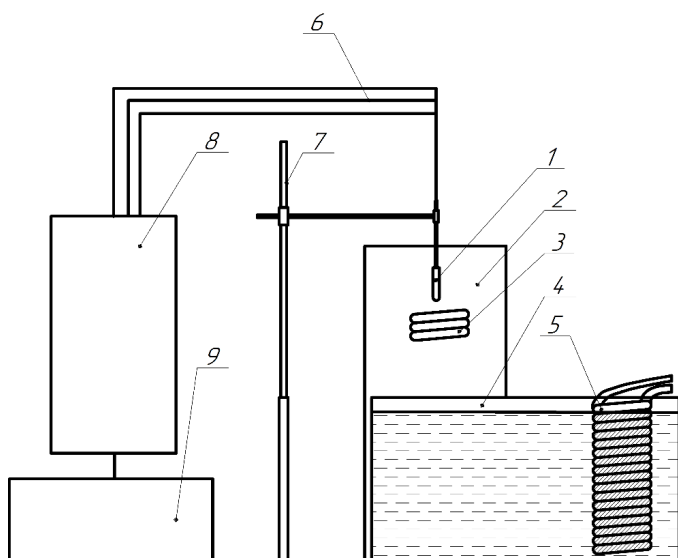


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: 1 — рабочий участок; 2 — ВЧ-индуктор; 3 — катушка индуктора; 4 — экспериментальный сосуд; 5 — змеевик (соединен с термостатом); 6 — провода термопар; 7 — механизм перемещения рабочего образца; 8 — измерительный модуль; 9 — персональный компьютер.

уделено внимание возникновению особого режима теплообмена. По прошествии лет работа получила развитие в связи с ростом интереса к быстрым реакторам с натриевым теплоносителем. В своей работе 2018 года [20] французские ученые проанализировали эксперименты [19] для построения модели перехода к интенсивному теплообмену, который может сопровождаться взрывами, если расплавленный металл находится все еще в жидком состоянии. Анализ результатов показал наличие интенсивного режима теплообмена, возникающего при охлаждении в натрии с большими недогревами.

Данная работа направлена на изучение влияния свойств поверхности на теплообмен при охлаждении высокотемпературных цилиндрических тел в жидкостях с различными теплофизическими свойствами, а также на определение температуры перехода к интенсивному режиму теплообмена.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты, представленные в данной работе, проводились при атмосферном давлении, схема установки представлена на рисунке 1. Преимуществом данного стенда является возможность проведения экспериментов на различных жидкостях с различными температурами (от -80 до 100 °C) при атмосферном давлении. Дополнительная серия экспериментов показала, что время, в течение которого нагретый образец находится в атмосфере, и возможные различия в скорости движения образца в жидкости не оказывают существенного влияния на исследуемый процесс [21].

Основой установки является экспериментальный сосуд (4), заполненный охлаждающей жидкостью. Сначала образец (1) помещается в катушку (3) высокочастотного индуктора (2), где происходит его нагрев. Когда температура испытуемого образца достигает требу-

емого значения, образец погружается в сосуд с жидкостью вручную при помощи рычага (7). Температура жидкости регулируется змеевиком (5), подключенным к термостату. Образец погружается в охлаждающую жидкость через открытую атмосферу, что дает возможность контролировать состояние поверхности образца.

Во время охлаждения образца электрический сигнал от термопар (6) проходит на измерительный модуль NI SCXI-1102 (8). Сигнал от каждой термопары регистрируется с частотой 100 Гц. Полученные данные поступают на персональный компьютер (9) через USB-интерфейс, где зависимость температуры от времени строится в программе Lab View.

Рабочие образцы представляют собой цилиндры из различных металлов. Цилиндры имеют одинаковые размеры: диаметр 10 мм и длина 50 мм. Такая геометрия выбрана для большего сходства с тепловыделяющим элементом, во избежание концевых эффектов цилиндры имеют сферическую головку. Стоит отметить, что экспериментальные результаты, представленные в работе [22], показали увеличение теплоотдачи примерно на 20 % при охлаждении высокотемпературного цилиндра с полусферическим дном по сравнению с плоской поверхностью.

Были подготовлены образцы из двух металлов — никеля и меди с золотым покрытием. Тепловая активность ($a = \sqrt{\rho c \lambda}$, где ρ — плотность, c — теплоемкость, λ — теплопроводность) никеля, меди и золота — 18900, 37000 и 28000 Вт/м²·К·с^{1/2} соответственно. Медь имеет низкую стойкость к окислению, особенно при высоких температурах. Поэтому золотое покрытие выполняло защитную функцию, что дало возможность проведения многочисленных циклов нагрева и охлаждения образца. Золотое покрытие наносилось гальваническим способом, после чего образец был отполирован. Толщина покрытия составляла 5 мкм, среднеарифметическое отклонение профиля R_a равнялось 1 мкм. Никелевый цилиндр также полировался с использованием полирующих керамических Al_2O_3 и фарфоровых частиц, результаты профилометрии показали, что R_a составляет 0.2 мкм.

Поскольку медь и золото обладают высокой теплопроводностью, в данном образце устанавливалась одна термопара — центральная. Технология крепления термопары представлена на рисунке 2(а). Термопара (4) вставляется в центр образца (1), при этом горячий спай надёжно фиксируется благодаря графитовому уплотнению (2) после вкручивания трубки-державки (3) в образец. Основным преимуществом этой технологии является возможность ремонта образца с помощью замены неисправной термопары.

В никелевом цилиндре технология крепления термопар имеет отличия. Поскольку никель обладает более низкой теплопроводностью, температура измерялась в двух местах — в центре и на поверхности (в дне цилиндра, на расстоянии примерно 0.5 мм от поверхности). На рисунке 2(б) показана схема заделки двух термопар в никелевом образце. Крепление термопар в образце осуществлялось при помощи цангового зажима, а для лучшего контакта королька термопары с поверхностью использовалась смесь жидких металлов индия и галлия.

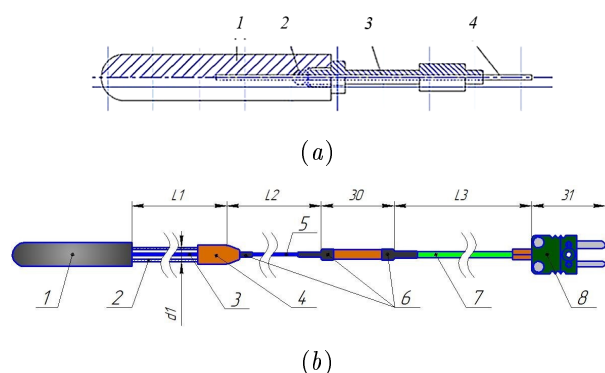


Рисунок 2. Схемы заделки термопар. В медном цилиндре (а): 1 — образец, 2 — уплотнение из графита, 3 — трубка-державка, 4 — кабель термопары. В никелевом образце (b): 1 — образец; 2 — трубка-державка ($d_1 = 3\text{ мм}$); 3 — термокабель, проходящий внутри трубки-державки (тип К — хромель-алюмель) $d=1\text{ мм}$; 4 — зажимная цапга для фиксации термокабеля; 5 — выпуск термокабеля из трубки-державки; 6 — термоусадка; 7 — удлиняющий (компенсационный) провод тип К; 8 — штекер стандарт тип К.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения экспериментов были получены зависимости температуры цилиндров от времени — термограммы охлаждения. В подавляющем большинстве работ в качестве охлаждающей жидкости используется вода. Это обусловлено ее широкой распространенностью в реальных технологических процессах, так как она доступна и химически инертна, а также обладает уникальными теплофизическими свойствами (теплота парообразования, поверхностное натяжение, теплоемкость). Однако для понимания физических механизмов, управляющих микропузырьковым кипением, необходимы эксперименты на неводных жидкостях с отличными от воды свойствами. На рисунке 3 представлены термограммы охлаждения цилиндров в недогретом этаноле $\Delta T_{sub} = 48\text{ К}$. Для никелевого цилиндра термограммы охлаждения были получены по температуре поверхности, для медного — по температуре центра, которая практически совпадает с поверхностной температурой. Как видно из полученных результатов, охлаждение характеризуется низкой интенсивностью, а температура поверхности, при которой наступает режим интенсивного теплообмена (далее — температура перехода) ниже критической температуры для этанола как для медного, так и для никелевого цилиндров. Это достаточно предсказуемый результат, поскольку прямой контакт жидкость–твердое тело возможен в том случае, когда температура охлаждаемой поверхности ниже, чем критическая температура жидкости [23].

Процессы охлаждения в воде значительно отличаются от охлаждения в этаноле. Отметим, что термограммы охлаждения для никелевого и медного цилиндров имеют различную температурную шкалу: никелевый образец нагревался до более высоких температур порядка 700 °C (рисунок 4(а)).

При охлаждении в воде с температурой 80 °C ($\Delta T_{sub} = 20\text{ К}$) начальный этап процесса охлаждения также протекает в режиме устойчивого пленочного кипения (кривые 1 на рисунках 4(а,б)), однако переход к

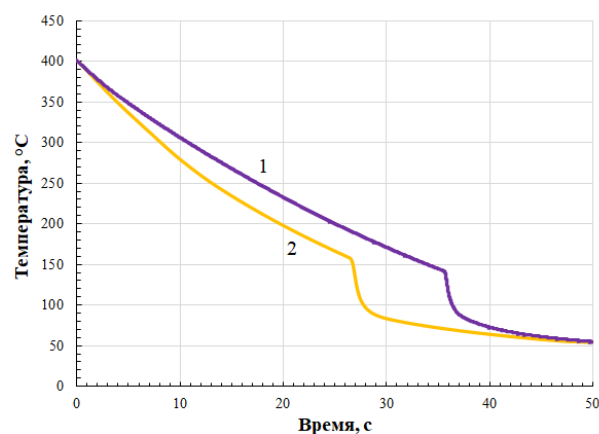
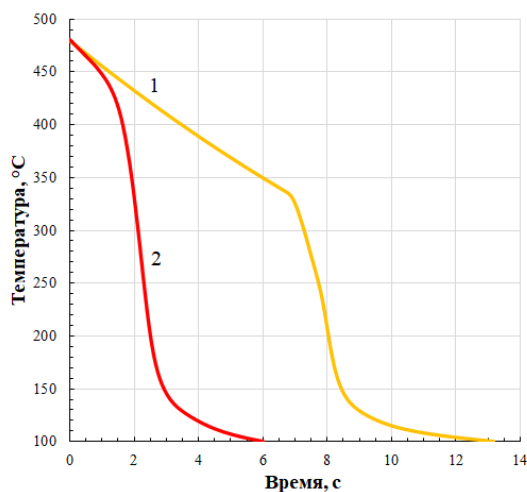


Рисунок 3. Термограммы охлаждения в этаноле с недогревом $\Delta T_{sub} = 48\text{ К}$ при атмосферном давлении: 1 — никелевый цилиндр (температура поверхности), 2 — медный цилиндр с золотым покрытием (температура центра).

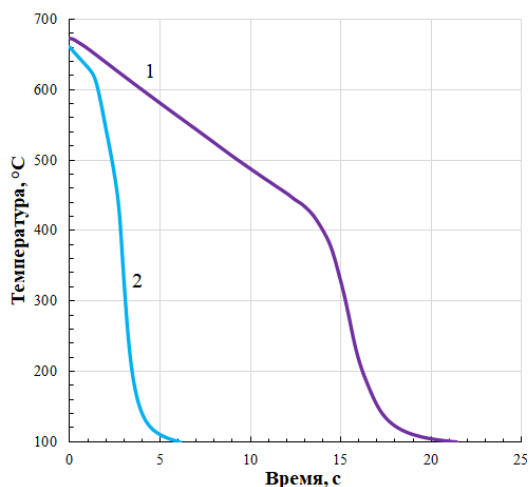
интенсивному охлаждению наблюдался при более высоких температурах, чем при охлаждении в этаноле. Для никелевого цилиндра эта температура превышает критическую температуру воды. С увеличением недогрева воды еще на 20 К температура перехода увеличивается, и режим микропузырькового кипения наблюдается для обоих цилиндров (кривые 2 на рисунках 4(а,б)). Когда недогрев составляет 40 К , температура перехода превышает 400 °C при охлаждении медного цилиндра с золотым покрытием и превышает 600 °C при охлаждении никелевого цилиндра. Это выглядит удивительным, так как при таких температурах прямой контакт жидкости и твердой поверхности невозможен.

Для расчета коэффициентов теплоотдачи и плотностей тепловых потоков, отводимых от цилиндров в процессе охлаждения, была решена обратная задача теплопроводности (ОЗТ). Для этого использовался программный комплекс ANSYS, где задача решалась в двумерной осесимметричной постановке. На верхнем торце цилиндра и на участке боковой поверхности длиной 1 мм от верхнего торца принимались адиабатные условия, так как в процессе эксперимента образец погружался в жидкость не полностью. На остальной поверхности (боковая и сферическая) принимались граничные условия 3-го рода, в качестве температуры охлаждающей жидкости принималась температура насыщения жидкости при давлении из условий эксперимента. С использованием ANSYS Fluent на каждом шаге по времени определялось температурное поле внутри расчетной области. На каждом шаге по времени с помощью средств оптимизации осуществлялся подбор коэффициентов теплоотдачи (КТО) на поверхности цилиндра. Условием оптимизации было совпадение температуры в контрольной точке расчетной области и значения показаний термопар, установленных в реальном образце. Для никелевого цилиндра подбор КТО осуществлялся по значению термопары, расположенной на поверхности; для медных цилиндров в качестве контрольной использовалась центральная термопара.

В результате были получены зависимости теплового потока от температурного напора при охлаждении цилиндров в этаноле $\Delta T_{sub} = 48\text{ К}$ и воде $\Delta T_{sub} = 40\text{ К}$



(a)



(b)

Рисунок 4. Термограммы охлаждения в воде с различными недогревами при атмосферном давлении: медный цилиндр с золотым покрытием (a); никелевый цилиндр (b) — средняя температура поверхности. 1 — $\Delta T_{sub} = 20$ К, 2 — $\Delta T_{sub} = 40$ К.

(рисунок 5). При охлаждении в этаноле устойчивое пленочное кипение, которое характеризуется низкими значениями КТО (не более 500 кВт/м^2) и отводимых тепловых потоков, сохраняется продолжительное время как при охлаждении медного, так и никелевого цилиндров. Рисунок 5 наглядно демонстрирует существенную разницу в значениях отводимых тепловых потоков при охлаждении в воде. Тепловые потоки достигают огромных значений — до 5 МВт/м^2 , что несвойственно режиму пленочного кипения. Пленочное кипение при охлаждении высокотемпературных образцов в воде с большим недогревом занимает всего несколько секунд, после чего замечен резкий рост тепловых потоков. Причем для образца с более низкой тепловой активностью (никель) максимум отводимых тепловых потоков почти в 2 раза выше, чем при охлаждении высокотеплопроводного медного образца. Также этот максимум наблюдается при более высоких температурных напорах для охлаждения никелевого цилиндра.

В программном комплексе ANSYS также были получены температурные распределения в образцах с раз-

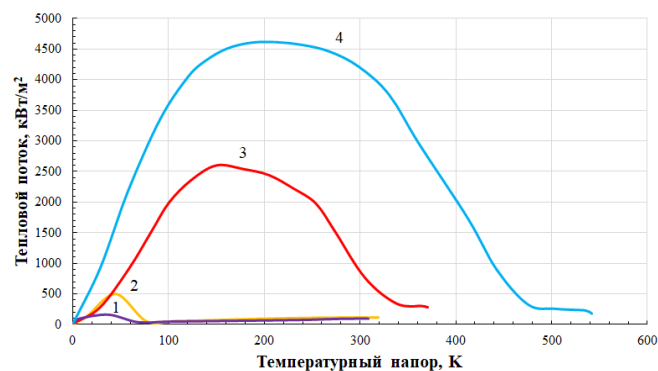


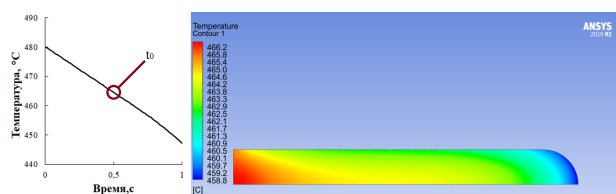
Рисунок 5. Зависимости теплового потока от температурного напора при охлаждении: 1 — никелевого цилиндра в этаноле с недогревом $\Delta T_{sub} = 48$ К, 2 — медного цилиндра с золотым покрытием в этаноле с недогревом $\Delta T_{sub} = 48$ К, 3 — медного цилиндра с золотым покрытием в воде с недогревом $\Delta T_{sub} = 40$ К, 4 — никелевого цилиндра в воде с недогревом $\Delta T_{sub} = 40$ К (соответствуют рисунку 3 и рисунку 4(a,b) кривые 2).

личной тепловой активностью металла в процессе их охлаждения. На рисунке 6 представлены температурные поля в центральном сечении цилиндра в моменты устойчивого пленочного кипения (начало охлаждения) при охлаждении цилиндров из меди и никеля в воде 60°C . Для наглядности, слева на рисунках 6 и 7 представлены части термограмм охлаждения для этих температурных полей. Как и ожидалось, в режиме устойчивого пленочного кипения температуры центра и поверхности отличаются не более, чем на $5\text{--}10^\circ\text{C}$ как для медного, так и для никелевого цилиндра.

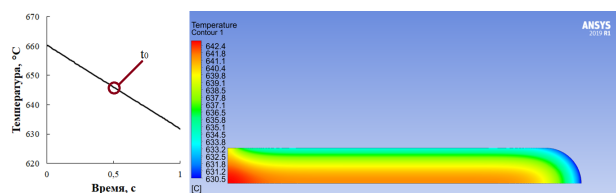
Наибольший интерес представляют моменты времени, когда от охлаждаемой поверхности отводятся максимальные тепловые потоки, так как в это время возможны наибольшие расхождения в значениях температуры центра и поверхности. На рисунке 7 изображены температурные поля во время отведения максимальных тепловых потоков для сравнения с распределениями температур в режиме пленочного кипения. Во время интенсивного отвода тепла разница между температурами центра и поверхности более выражена. Если для медного цилиндра температурное поле также остается достаточно равномерным, хотя разница между температурами центра и поверхностью составляет около 40°C (рисунок 7(a)), то для никелевого цилиндра эта разница составляет более 150°C (рисунок 7(b)). Для никелевого цилиндра характерен сильно прогретый центр с резким уменьшением температуры вблизи поверхности. Кроме того, температурные градиенты более выражены вдоль осевого положения, чем по радиальному, что также было замечено индийскими исследователями при закалке образцов в минеральном масле [14]. Эти результаты подтверждают необходимость измерения температуры в образцах с низкой теплопроводностью не только в центре, но и на поверхности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты подтверждают существование высокоинтенсивного процесса теплообмена в воде с большими недогревами $\Delta T_{sub} \geq 20$ К, при этом

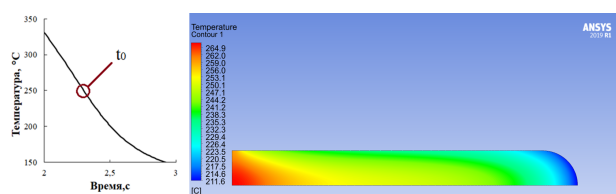


(a)

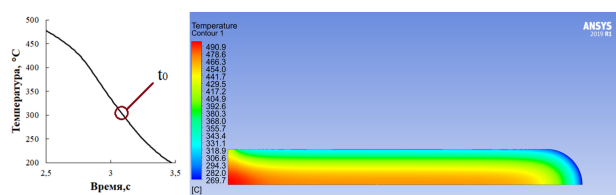


(b)

Рисунок 6. Температурное поле, полученное во время устойчивого пленочного кипения при охлаждении в воде с недогревом $\Delta T_{sub} = 40$ К: медный цилиндр с золотым покрытием (a); никелевый цилиндр (b). t_0 — время, соответствующее полю температур справа.



(a)



(b)

Рисунок 7. Температурное поле, полученное во время интенсивного охлаждения в воде + 60 °С: медный цилиндр с золотым покрытием (a); никелевый цилиндр (b). t_0 — время максимального удаления теплового потока, соответствующее полю температур справа.

температура перехода к интенсивному охлаждению имеет значения выше критической при охлаждении цилиндров из меди и никеля. При недогреве $\Delta T_{sub} = 20$ К интенсивный теплообмен начинался при температуре выше критической только при охлаждении цилиндра из никеля. Термограммы показывают, что в воде процесс охлаждения более интенсивен, а в этаноле режим микропузырькового кипения не наблюдается вовсе. Хотя, как свидетельствуют результаты работы [24], в этаноле возможно добиться перехода к интенсивному режиму, но при очень высоких его недогревах, при этом аномально высокая вязкость способствует затягиванию режима устойчивого пленочного кипения. Проведенные эксперименты демонстрируют, что на возникновение микропузырькового кипения влияет множество факторов, таких как свойства охлаждающей жидкости (теплота парообразования, поверхностное натяжение, вязкость) и ее недогрев [25], а также тепловая активность охлаждаемых образцов. Приближенная физическая модель,

предложенная в 2018 г. [26], дает пояснения этим механизмам и позволяет прогнозировать температуру перехода к интенсивному режиму теплообмена с приемлемой точностью. Для корректировки и проверки модели необходимо проведение дальнейших экспериментов по охлаждению высокотемпературных образцов с различными теплофизическими свойствами и шероховатостью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60057.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aziz S, Hewitt G F and Kenning D I 1986 Heat transfer regimes in forced-convection film boiling on spheres *International Heat Transfer Conference Digital Library*
2. Lee Y, Mckrell T J and Kazimi M S 2013 *Nuclear Engineering and Technology* **45** 811–820
3. Heikinheimo J, Huottilainen C, Pohja R, Ivanchenko M and Loukusa H 2019 Advanced cladding materials for accident tolerant fuels *Nuclear Science and Technology Symposium, NST 2019*
4. Ott L J, Robb K R and Wang D 2014 *Journal of Nuclear Materials* **448** 520–533
5. Seo G H, Jeun G and Kim S J 2015 *Experimental Thermal and Fluid Science* **64** 42–53
6. Tang C, Grosse M, Steinbrueck M and Shirvan K 2019 *Topfuel, Seattle* 855–863
7. Idarraga-Trujillo I *et al* 2013 Assessment at cea of coated nuclear fuel cladding for lwrs with increased margins in loca and beyond loca conditions *Conference Paper) LWR Fuel Performance Meeting, Top Fuel 2013* vol 2 pp 860–867
8. Kalinin E, Berlin I and Kostiouk V 1987 Transition boiling heat transfer *Advances in heat transfer* vol 18 (Elsevier) pp 241–323
9. Tsoi A and Pavlenko A 2015 *Thermophysics and Aeromechanics* **22** 707–712
10. Pavlenko A N, Tsoi A N, Surtaev A S, Kuznetsov D V and Serdyukov V S 2016 *High Temperature* **54** 370–376
11. Pavlenko A N, Tsoi A N, Surtaev A S, Kuznetsov D V, Kalita V, Komlev D, Ivannikov A Y and Radyak A 2018 *High Temperature* **56** 404–409
12. Li R, Wu X and Huang Z 2019 *Experimental Thermal and Fluid Science* **106** 255–264
13. Zabirov A, Kanin P, Vinogradov M and Sharafutdinov A 2018 Factors affecting quenching in cryogenic liquids *IOP Conf. Series: J. Phys. Conf. Ser.* vol 1128 p 012015
14. Ramesh G and Prabhu K N 2014 *Experimental thermal and fluid science* **54** 158–170
15. Жилин В Г, Зейгарник Ю А, Ивочкин Ю П, Оксман А А и Белов К И 2009 *Теплофизика высоких температур* **47(6)** 891–898
16. Li J Q, Mou L W, Zhang Y H, Yang Z S, Hou M H, Fan L W and Yu Z T 2018 *Experimental Thermal and Fluid Science* **92** 103–112
17. Dedov A V, Zabirov A R, Sliva A, Fedorovich S and Yagov V 2019 *High Temperature* **57** 63–72
18. Khomutov N, Oparin A, Piskunov M and Yan W M 2020 *International Journal of Thermal Sciences* **148** 106164
19. Farahat M M K 1972 Transient-boiling heat transfer from spheres to sodium *Preprint (Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States))*
20. Berthoud G, Le Belguet A and Zabiégo M 2018 *Experimental Thermal and Fluid Science* **91** 117–125
21. Yagov V V, Zabirov A R and Lexin M A 2015 *Thermal Engineering* **62** 833–842
22. Momoki S, Toyoda K, Yamada T, Shigechi T and Yamaguchi T 2009 *Journal of Power and Energy Systems* **3** 182–193

23. Skripov V P 1974 *Metastable liquids* (Wiley)
24. Zabirov A, Yagov V and Kanin P 2017 Intensive cooling metallic bodies with low thermal conductivity in film boiling of ethanol *Journal of Physics: Conference Series* vol 891 p 012014
25. Yagov V, Zabirov A, Kaban'kov O and Minko M 2017 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **110** 219–230
26. Yagov V V, Zabirov A R and Kanin P K 2018 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **126** 823–830