

УДК 536.423.1

**О способах заделки термопар
в экспериментальных исследованиях
охлаждения высокотемпературных тел
в недогретых и насыщенных жидкостях***

А.Р. Забиров¹, И.А. Молотова², И.А. Беляев¹, В.А. Рязанцев², В.В. Ягов²

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

²*Московский энергетический институт, Москва*

E-mail: zabirov.arслан@gmail.com

В работе анализируются методы температурных измерений охлаждения высокотемпературных тел в жидкостях. Проведены экспериментальные исследования на цилиндрических образцах с различной заделкой термопар в трех жидкостях. Показано, что даже в случае охлаждения в насыщенных жидкостях внешние термопары, электроды которых играют роль ребер охлаждения, существенно искажают измеряемые температуры. По внешним термопарам невозможно правильно зафиксировать темп охлаждения горячих тел в жидкости и температуру перехода охлаждения к интенсивному режиму. Использование только центральной термопары допустимо при малых числах Био. Однако даже в этом случае при интенсивном режиме охлаждения разница между температурами центра и поверхности может достигать нескольких десятков градусов. С уменьшением теплопроводности образца и увеличением его линейных размеров температурный градиент растет (особенно в интенсивном режиме охлаждения), и правильная физическая интерпретация процесса становится невозможной.

Ключевые слова: кипение, эксперимент, термопара, микропузырьковое кипение, эффект Лейденфроста.

Введение

Нестационарное охлаждение высокотемпературных тел в жидкостях (закалка) — широко распространенное явление, наблюдаемое в большом количестве технологических процессов, например, при металлообработке в металлургии [1] или в атомной энергетике при поставарийном заливе активной зоны ядерного реактора [2] и паровом взрыве [3]. Последние годы в области атомной энергетики активизирована масштабная программа исследований в области создания нового, невосприимчивого к авариям топлива, которая включает в себя локальные и интегральные эксперименты по влиянию свойств новых материалов на теплообмен в случае максимальной проектной аварии с потерей теплоносителя [4]. Учитывая высокую стоимость выполнения интегральных экспериментов на модельных сборках, необходимо тщательно подходить к методике измерений и их последующей интерпретации.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-38-60057).

Как показывает анализ литературы, посвященной процессам охлаждения высокотемпературных тел в жидкостях, эксперименты выполняются по одной методике: металлический образец нагревается до заданной температуры, а затем погружается в охлаждающую жидкость [5]. Обычно образец имеет сферическую или цилиндрическую форму, а материалом служит сталь, цирконий, никель или медь. В подавляющем большинстве работ в качестве охлаждающей среды используется вода [6], реже — спирты [7] и водно-спиртовые смеси [8], криожидкости [9, 10], фреоны [11] и фторуглероды [12]. Обычно опыты проводятся при температуре охлаждающей жидкости, близкой к температуре насыщения, однако есть работы, направленные на изучение влияния недогрева как при атмосферном, так и при повышенном давлении. Цель настоящего эксперимента заключается в получении термограмм охлаждения (зависимостей температуры от времени), необходимых для дальнейшего анализа процесса (определения температуры смены режимов кипения, восстановления граничных условий на поверхности).

Несмотря на активные попытки использовать в качестве измерительных устройств гетерогенные градиентные датчики теплового потока, которые позволяют напрямую проводить измерения плотности теплового потока [13], а также оптоволоконные датчики, измеряющие спектральный сдвиг в осевом местоположении, преобразующийся впоследствии в измерение температуры [14], эти методы пока еще находятся на начальном этапе своего развития. Традиционно термограммы получают по показаниям термопар, заложенных в образец. Однако способ и местоположение их крепления оказывает прямое влияние на значения получаемых данных. Можно выделить четыре способа монтажа термопар.

1. Горячий спай зафиксирован в геометрическом центре образца. Большинство исследователей используют эту схему, как наиболее простую и дешевую. Однако если это оправдано на небольших образцах с высокой теплопроводностью (серебро, медь), то использование такой заделки на металлах с низкой теплопроводностью, особенно в условиях возникновения режима интенсивного теплообмена, вызывает много вопросов. Преимуществом метода является его простота и дешевизна [15].

2. Горячий спай зафиксирован вблизи поверхности (на глубине 0,5–2 мм). Особенностью этого метода является сложность точного определения положения горячего спая относительно поверхности. Преимущества же метода заключаются в отсутствии дефектов на поверхности образца, а также в довольно точном восстановлении поверхностной температуры при наличии информации о положении горячего спая [16].

3. Горячий спай монтируется заподлицо с поверхностью, кабель заходит изнутри. Этот способ подразумевает непосредственное измерение температуры поверхности. Сложность использования метода заключается в трудности его реализации, невозможности ремонта образца и замены термопары, кроме того, установленный таким образом горячий спай вносит возмущения в изучаемый процесс. В процессе эксплуатации часто происходит потеря герметизации сварного шва (вследствие коррозионного и термомеханического воздействия), что приводит к разрушению горячего спая [17].

4. Горячий спай крепится с внешней стороны образца методом контактной сварки или клеем [18], что представляет собой самый простой и дешевый способ крепления термопар к образцу. В условиях однофазной конвекции влияние электродов, выводимых через жидкость, минимизируют, размещая их на длине, большей 10 диаметров электрода, по изотермической поверхности. В этом случае заметных возмущений не возникает. Однако присоединение горячего спая к поверхности со стороны жидкости даже в условиях пленочного кипения вносит возмущения и влияет на протекание самого процесса кипения. На электродах на малом расстоянии от спая возникает пузырьковое кипение с коэффициентами теплоотдачи (КТО) на 1–2 порядка большими, чем при пленочном кипении на испытуемой поверхности в режимах охлаждения. Это приводит к отводу теплоты по термоэлектродам от места измерения и его более быстрому охлаждению.

Процесс нестационарного охлаждения (закалки) в некоторых условиях сопровождается появлением особого вида кипения, так называемого микропузырькового кипения, впервые подробно описанного в работе [19]. Этот режим характеризуется высокими значениями КТО и отводимых тепловых потоков при средней температуре поверхности на сотни градусов выше, чем температура предельного перегрева жидкости. Наличие такого режима кипения накладывает дополнительные ограничения на технику измерений, в то время как при устойчивом пленочном кипении из-за малости КТО и низкой скорости охлаждения больших проблем не возникает даже при использовании одной «внутренней» термопары. В работе [20] было экспериментально продемонстрировано, что КТО, полученные при охлаждении с использованием метода сосредоточенной теплоемкости, не отличаются от КТО, полученных при стационарном пленочном кипении, но менее трудоемки. Напомним, что метод сосредоточенной теплоемкости представляет собой задачу распространения тепла в однородной среде, в которой имеется точечная масса с конечной теплоемкостью. Это справедливо, когда можно пренебречь распределением температуры по объему и принять, что его тепловые свойства характеризуются теплоемкостью (малые линейные размеры и высокая теплопроводность). Тогда для нахождения плотности теплового потока в процессе нагревания или охлаждения тела можно воспользоваться уравнением $q = \rho c (V/S)(dT/dt)$, где ρ — плотность, c — теплоемкость, V/S — отношение объема к площади, dT — изменение температуры тела за промежуток времени dt . При этом в случае охлаждения в недогретой воде существует режим интенсивного охлаждения, сопровождающийся высоким темпом охлаждения (до 1000 К/сек). Многие исследователи безосновательно переносят эту особенность пленочного кипения на режимы интенсивного охлаждения, получая при этом сомнительные результаты [21]. Обосновать возможность использования одной центральной термопары можно с помощью безразмерного числа Био, которое представляет собой отношение внутреннего термического сопротивления теплопроводности к внешнему термическому сопротивлению теплоотдачи: $Bi = \alpha\delta/\lambda$, где α — коэффициент теплоотдачи, δ — характерный размер и λ — коэффициент теплопроводности тела.

Следует отметить, что интенсивный режим охлаждения возникает в случайных точках теплоотдающей поверхности. Поэтому идеальный эксперимент подразумевает большое количество термопар, что на практике неосуществимо. Однако наличие трех или четырех поверхностных термопар лучше, чем одна, а результаты, полученные при их осреднении, более представительны [22].

Таким образом, при изучении нестационарного охлаждения высокотемпературных тел в жидкостях на достоверность и полноту полученных экспериментальных данных влияет как способ заделки термопар, так и их количество. В общем случае речь идет о сравнительно небольшом числе термопар и вопрос их размещения в образце приобретает важное значение.

Методика эксперимента

Эксперименты по охлаждению высокотемпературных образцов в жидкостях проводились на установке, схема и описание которой были представлены в работе [5]. Рабочий образец нагревался до заданной температуры (450–700 °С) и погружался в охлаждающую жидкость, температура которой поддерживалась постоянной. Эксперименты проводились при атмосферном давлении на трех жидкостях с различными теплофизическими свойствами: вода, этанол и перфторгексан.

Для проверки допустимости заделки термопар внешним и внутренним способами был подготовлен образец, представляющий собой толстостенную трубу из нержавеющей стали высотой 60 мм с внешним и внутренним диаметрами 30 и 10 мм соответственно (рис. 1). Для обеспечения герметичности сверху и снизу приваривались заглушки из того же материала. Термопарный кабель (тип ХА) со стороны горячего спая

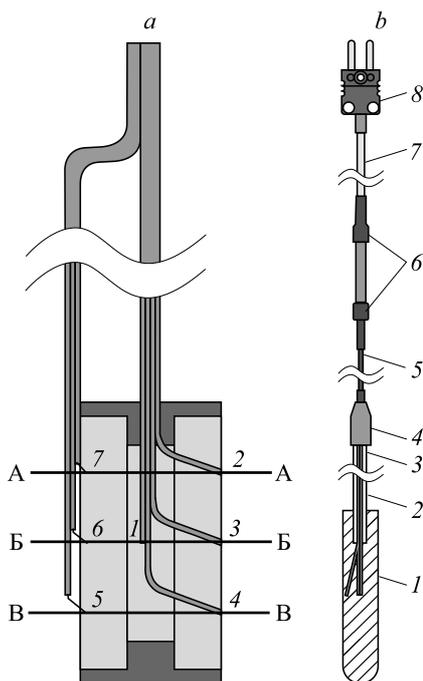


Рис. 1. Схема заделки внутренних и внешних термопар для цилиндра из нержавеющей стали (а) и схема заделки внутренних термопар в цилиндрах из меди и нержавеющей стали (b).

Термопары: центральная (1), внутренние (2–4) и внешние (5–7); 1 — цилиндрический образец, 2 — трубка-державка, 3 — термокабель, проходящий внутри трубки-державки (тип К — хромель-алюмель), 4 — зажимная цапга для фиксации термокабеля, 5 — выпуск термокабеля из трубки-державки, 6 — герметизирующая изоляция, 7 — удлиняющий (компенсационный) провод тип К, 8 — штекер стандарт тип К.

вскрывался с целью освобождения термоэлектродов от оболочки на длину 5 мм. После этого термоэлектроды остекловывались для обеспечения герметизации и удержания их в нужном положении. Диаметр электродов термопар составлял 150 мкм, а размер спая — 250 мкм. Четыре внешние термопары (5–7 рис. 1а), кабели которых фиксировались на скобе нержавеющей стали, крепились с помощью лазерной контактной сварки к боковой поверхности на одинаковом расстоянии друг от друга. Для сравнения с показаниями внешних термопар монтировались четыре внутренние термопары (1–4 рис. 1а), одна из которых находилась в центре цилиндра, а три поверхностных были введены через отверстия, просверленные в стенке трубы, и закреплялись заподлицо с поверхностью в тех же плоскостях, что и внешние термопары. Кроме этого, для сравнения температур в центре и на поверхности охлаждаемых образцов были проведены эксперименты по охлаждению в воде двух цилиндров одинакового размера (диаметром 10 мм и длиной 50 мм), выполненных из металлов с различными теплофизическими свойствами (медь и нержавеющая сталь). Медный цилиндр был покрыт тонким слоем золота толщиной 5 мкм во избежание окисления при нагревах до высоких температур. В цилиндре из меди температура измерялась лишь в центре образца, а в цилиндре из нержавеющей стали — в центре и на боковой поверхности на уровне центра цилиндра, не доходя примерно 0,5 мм до самой поверхности. Схема заделки термопар для этих цилиндров представлена на рис. 1b. Отверстия под термопары диаметром 0,7 мм прожигались с верхней образующей цилиндра электроэрозионным методом. Горячий спай надежно фиксировался графитовым уплотнением после вкручивания трубки-державки в образец и при помощи цапгового зажима. Для лучшего контакта королька термопары с поверхностью использовалась смесь жидких металлов индия и галлия.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные результаты

В результате охлаждения цилиндра с внутренней и внешней заделкой термопар были получены термограммы для его различных сечений, представленные на рис. 2. Эксперименты выполнялись в недогретых воде, этаноле и перфторгексане. Для процессов, представленных на рис. 2b–2d, показания внутренних и наружных термопар усреднялись для удобства сравнения полученных значений при внутренней и наружной заделке. Дольше всего охлаждается центр образца (кривая 1 рис. 2а), что связано с более длительным откликом термопары на внешнее воздействие из-за большого термического сопротивления между центром и поверхностью. На всех представленных на рис. 2 зависимостях видно, что термограммы, полученные по показаниям внутренних и наружных термопар,

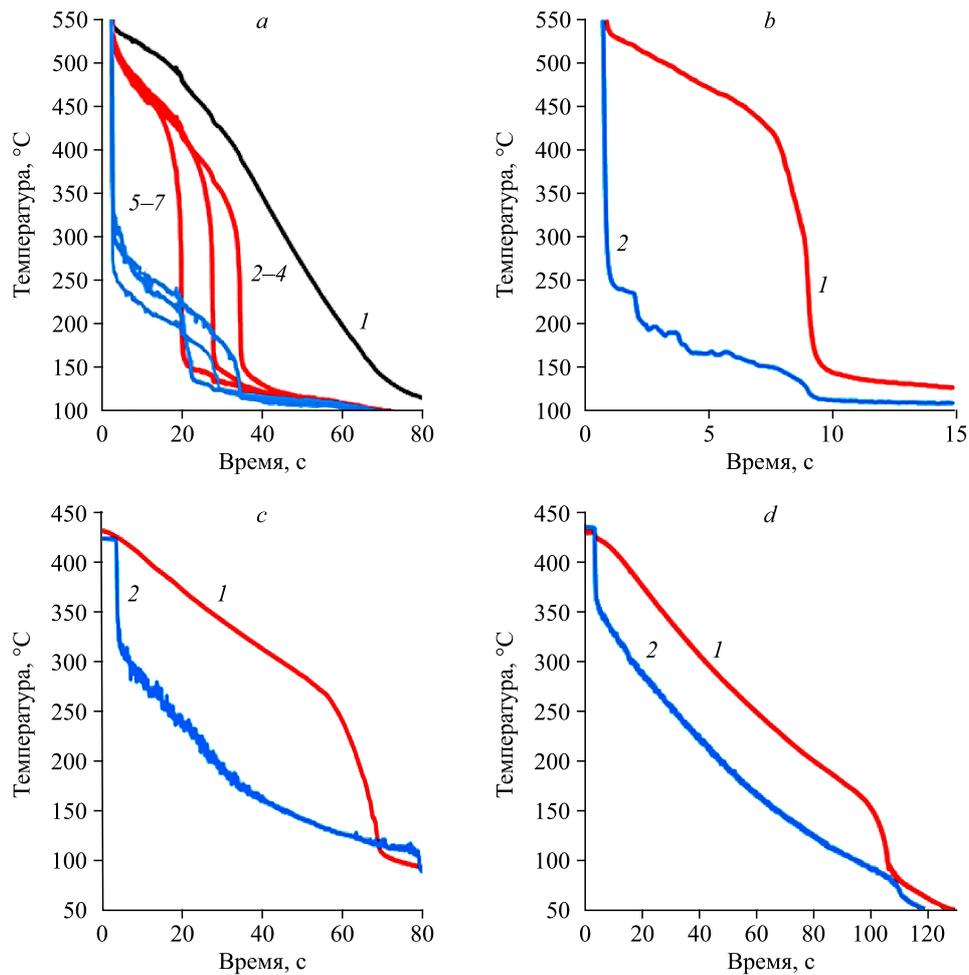


Рис. 2. Термограммы охлаждения цилиндра из нержавеющей стали с внутренней и внешней заделкой термопар в жидкостях с различной температурой при атмосферном давлении. Жидкости: вода $\Delta T_{\text{sub}} = 10$ (a), 30 (b) К, этанол $\Delta T_{\text{sub}} = 20$ (c) К, перфторгексан $\Delta T_{\text{sub}} = 40$ (d) К. Показания термопар на рис. 2a: 1 — термопара, расположенная в центре, 2–4 — внутренние термопары (низ, середина, верх), 5–7 — внешние термопары (низ, середина, верх); на рис. 2b–2d: 1 — усредненная температура по показаниям внутренних термопар (2–4), 2 — усредненная температура по показаниям внешних термопар (5–7).

не согласуются друг с другом даже качественно. При охлаждении во всех жидкостях показания внешних термопар демонстрируют резкое падение температуры сразу после погружения, а затем выход на менее интенсивный режим вплоть до температуры насыщения. Падение температуры зависит как от уровня недогрева жидкости, так и от ее теплофизических свойств, представленных в таблице. Действительно, на воде падение температуры на внешних термопарах составило 250–300 К, в то время как на этаноле — 110 К, а на перфторгексане — 70 К. Это объясняется тем, что при внешнем креплении термопара может рассматриваться как бесконечно длинный однородный стержень на массивном полупространстве охлаждаемого тела (ребро охлаждения). Интенсивность падения температуры при этом зависит от толщины паровой пленки, периметра и площади поперечного сечения термопары и определяется коэффициентом теплоотдачи между термопарой и окружающей средой [23]. Измеряемая температура отличается

Таблица
Теплофизические свойства жидкостей при температурах насыщения.
 Для воды $T_{\text{sat}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, для этанола $T_{\text{sat}} = 78 \text{ }^\circ\text{C}$,
 для перфторгексана $T_{\text{sat}} = 57 \text{ }^\circ\text{C}$

Жидкости	$\sigma \cdot 10^{-3}$, Н/м	$\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с	r , кДж/кг
Вода (H ₂ O)	58,9	0,3	2258
Этанол (C ₂ H ₆ O)	17,5	6,4	962
FC-72 (C ₆ F ₁₄)	11,3	0,4	76

от действительной из-за возникающей теплопроводности вдоль оси термопары и отвода теплоты с ее боковой поверхности в окружающую среду. Это подтверждается и визуальными наблюдениями: несмотря на то, что внешняя термопара демонстрирует резкое охлаждение, на всей поверхности цилиндра еще существует устойчивый пленочный режим продолжительное время. Этот режим сменяется на интенсивный в соответствии с показаниями термопар, подведенных к поверхности изнутри образца. Кроме того, для показаний внешних термопар заметны колебания температуры. Таким образом, эксперименты наглядно демонстрируют несостоятельность использования наружной заделки термопар для изучения процессов охлаждения высокотемпературных образцов в жидкостях. В работе [24] авторы также поставили под сомнение результаты [25], полученные с использованием внешних термопар при выполнении интегральных экспериментов, моделирующих температуру оболочки твэла при повторном заливе модельной сборки. Результаты их собственных исследований показали, что в точках крепления внешних термопар происходит локальное охлаждение оболочки на сотни К. Таким образом, полученные экспериментальные данные наглядно демонстрируют несостоятельность использования наружной заделки термопар для изучения процессов охлаждения высокотемпературных образцов в жидкостях.

Для сравнения температурных различий между центром и поверхностью при охлаждении образцов с высокой и низкой теплопроводностью были проведены эксперименты на двух цилиндрах одинаковой геометрии, выполненных из различных металлов — меди с золотым покрытием и нержавеющей стали. На рис. 3 представлены термограммы охлаждения этих образцов в воде с недогревом ($\Delta T_{\text{sub}} = 40 \text{ K}$) при атмосферном давлении. Температура в медном образце измерялась только в центре, а в цилиндре из нержавеющей стали — в центре и на поверхности. Термограмма охлаждения цилиндра из нержавеющей стали получена путем осреднения температур центра и поверхности. Для термограммы, представленной на рис. 3а, получены температурные распределения в центральном сечении цилиндров в разные моменты времени: при $t = 0,5 \text{ с}$ наблюдается устойчивое пленочное кипение с низкими темпами охлаждения (рис. 3b, 3d); при $t = 2,2 \text{ с}$ (для нержавеющей стали) и $9,9 \text{ с}$ (для меди) наблюдается режим интенсивного отвода тепла, когда значения отводимых тепловых потоков максимальны (рис. 3c, 3e).

Восстановление температурных полей проводилось с использованием программного комплекса ANSYS. На каждом шаге по времени подбирался коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра, а условием оптимизации являлось совпадение температуры в контрольной точке расчетной области и значения показаний термопар, установленных в образце. Как видно из рис. 3b, 3d, в условиях устойчивого пленочного кипения, которое характеризуется низкими темпами охлаждения, температурный градиент незначителен. Этот участок температурной кривой характеризуется малыми числами Био, что делает возможным использование одной центральной термопары для восстановления условий на поверхности методом сосредоточенной теплоемкости. Температурные поля, изображенные на рис. 3c, 3e, наглядно демонстрируют различия температур между центром и поверхностью, особенно выраженных для цилиндра из нержавеющей стали.

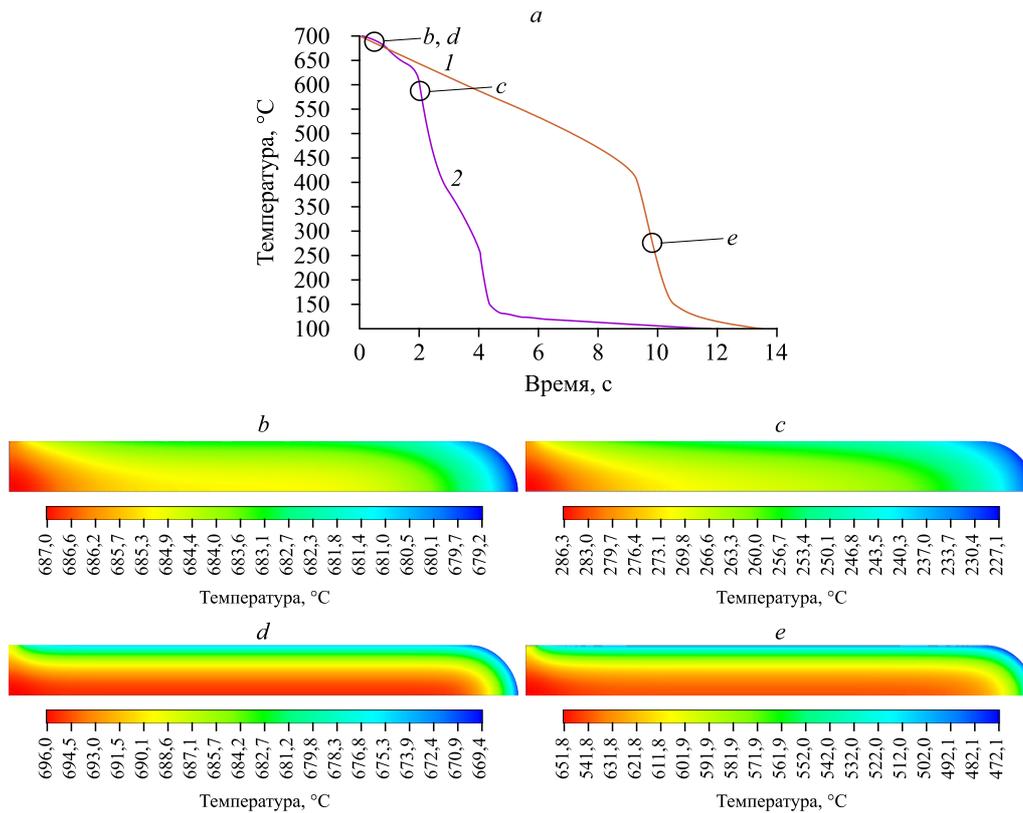


Рис. 3. Термограммы охлаждения цилиндров с различной теплопроводностью в воде при 60 °С.
 1 — медный цилиндр с золотым покрытием, 2 — цилиндр из нержавеющей стали (усредненная температура центра и поверхности); температурные поля во время устойчивого пленочного (*b, c*) и интенсивного режима кипения (*d, e*) на цилиндрах из меди (*b, d*) и нержавеющей стали (*c, e*).

Распределения температур имеют и качественные различия: если для медного цилиндра температурное поле является достаточно равномерным даже при интенсивном отводе тепла, то для цилиндра из нержавеющей стали наблюдается сильно прогретый центр с резким снижением температуры вблизи поверхности. При этом разница температур между центром и поверхностью для медного цилиндра составляет 40 К, а для нержавеющей стали — 160 К. Полученные результаты показывают, как от теплофизических свойств охлаждаемого тела зависит распределение температур по образцу в процессе охлаждения: для материалов с низкой теплопроводностью разница температур в несколько раз выше, чем для высокотеплопроводных образцов. Это указывает на необходимость измерений температуры не только в центре, но и на поверхности образцов, имеющих низкую теплопроводность.

Заключение

При экспериментальном исследовании нестационарного охлаждения горячих тел в жидкостях способ заделки термопарных преобразователей играет определяющую роль. Эксперименты по охлаждению полого толстостенного цилиндра, оснащенного наружными и внутренними поверхностными термопарами, и цилиндров из меди и нержавеющей стали с центральной и поверхностной термопарами, проведенные в трех различных жидкостях при недогревах ($10 \text{ K} \leq \Delta T_{\text{sub}} \leq 40 \text{ K}$), позволяют сформулировать следующие выводы.

При измерениях нестационарного охлаждения, сопровождающегося фазовыми переходами, внешнее крепление термопар на поверхности приводит к результатам, отличающимся от показаний внутренних термопар как количественно, так и качественно, так как электроды внешних термопар выступают в роли ребер охлаждения.

Использование одной термопары, заложенной в центре образца, не приводит к серьезным погрешностям только для относительно малых образцов с высокой теплопроводностью (медь, серебро). В образцах с низкой теплопроводностью использование одной центральной термопары допустимо только в случае устойчивого пленочного кипения, характеризующегося низкими значениями КТО. Фактически использование одной центральной термопары возможно при $Bi < 1$, тогда для восстановления условий на поверхности допустимо применение метода сосредоточенной теплоемкости.

При изучении интенсивного режима охлаждения, наблюдаемого в недогретой воде, использование поверхностных термопар, подведенных изнутри образца, безальтернативно. Наличие нескольких термопар в разных точках поверхности позволяет детальнее изучать процесс, отслеживая эволюцию фронта интенсивного охлаждения (смачивания), возникающего в случайных точках поверхности.

Список литературы

1. **Theory and technology of quenching: a handbook** / eds. Liscic B., Tensi H.M., Luty W. Springer Science & Business Media, 2013. 500 p.
2. **Safety of nuclear power plants: design** // IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1). Vienna, Austria, 2012. 66 p.
3. **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. 475–481.
4. **Shirvan K.** Implications of accident tolerant fuels on thermal-hydraulic research // Nuclear Engng and Design. 2020. Vol. 358, No. 2. Art. 110432.
5. **Zabirov A.R., Smirnova A.A., Feofilaktova Y.M., Shevchenko S.A., Yashnikov D.A.** Russian experimental database for validation of computer codes used for safety analysis of nuclear facilities // Progress in Nuclear Energy. 2020. Vol. 118. Art. 103061.
6. **Дедов А.В., Забиров А.Р., Слива А.П., Федорович С.Д., Ягов В.В.** Влияние углеродистого покрытия поверхности на теплообмен при нестационарном пленочном кипении // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 1. С. 72–82.
7. **Zabirov A.R., Yagov V.V., Kanin P.K.** Intensive cooling metallic bodies with low thermal conductivity in film boiling of ethanol // J. of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. P. 012014-1–012014-5.
8. **Лексин М.А., Ягов В.В., Забиров А.Р., Канин П.К., Виноградов М.М., Молотова И.А.** Исследование интенсивного охлаждения высокотемпературных тел в бинарной смеси вода–изопропанол // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 3. С. 393–401.
9. **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 // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56, № 3. С. 424–430.
10. **Zabirov A.R., Kanin P.K., Vinogradov M.M., Sharafutdinov A.M.** Factors affecting quenching in cryogenic liquids // IOP Conf. Series: J. of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1128, No. 1. P. 012015.
11. **Агальцов А.М., Походалова А.Б., Шмельков Ю.Б.** Исследование колебаний границы раздела жидкость–пар при пленочном кипении фреона-113 на поверхности сферы // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 6. С. 924–930.
12. **Yagov V.V., Laksin M.A., Zabirov A.R., Denisov M.A.** Film boiling of subcooled liquids. P. II: Steady regimes of subcooled liquids film boiling // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 100. P. 918–926.
13. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Субботина В.В.** Экспериментальное исследование пленочного кипения недогретой воды методом градиентной теплотрии // Письма в Журн. техн. физики. 2019. Т. 45, № 6. С. 10–12.
14. **Hurley P.R.** Application of optical fiber sensors for quenching temperature measurement // Doctoral dissertation, Virginia Tech. 2020. 99 p.
15. **Yeom H., Lockhart C., Mariani R., Xu P., Corradini M., Sridharan K.** Evaluation of steam corrosion and water quenching behavior of zirconium-silicide coated LWR fuel claddings // J. of Nuclear Materials. 2018. Vol. 499. P. 256–267.

16. **Ramesh G., Prabhu K.N.** Assessment of axial and radial heat transfer during immersion quenching of inconel 600 probe // *Experimental Thermal and Fluid Sci.* 2014. Vol. 54. P. 158–170.
17. **Yagov V.V., Lexin M.A., Zairov A.R., Kaban'kov O.N.** Film boiling of subcooled liquids. P. I: Leidenfrost phenomenon and experimental results for subcooled water // *Intern. J. of Heat and Mass Transfer.* 2016. Vol. 100. P. 908–917.
18. **Кобаско Н.И.** Закалка стали в жидких средах под давлением. Киев: Наукова думка, 1980. 205 с.
19. **Aziz S., Hewitt G.F., Kenning D.B.R.** Heat transfer regimes in forced-convection film boiling on spheres // *Proceedings of the 8th Intern. Heat Transfer Conf. San Francisco.* 1986. Vol. 5. P. 2149–2154.
20. **Аметистов Е.В., Клименко В.В., Павлов Ю.М.** Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1995. 400 с.
21. **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 // *Intern. J. of Heat and Mass Transfer.* 2015. Vol. 86. P. 65–71.
22. **Yagov V.V., Zairov A.R., Kaban'kov O.N., Minko M.V.** Heat transfer during cooling of high temperature spheres in subcooled water at different pressures // *Intern. J. of Heat and Mass Transfer.* 2017. T. 110. P. 219–230.
23. **Tsuruta T., Fujishiro T.** Evaluation of thermocouple fin effect in cladding surface temperature measurement during film boiling // *J. of Nuclear Sci. and Technology.* 1984. Vol. 21, No. 7. P. 515–527.
24. **Gunnerson F.S., Yackle T.R.** Quenching and rewetting of nuclear fuel rods // *Nuclear Technology.* 1981. Vol. 54, No. 1. P. 113–117.
25. **Gunnerson F.S., Sparks D.T.** Behavior of a nine-rod fuel assembly during power-cooling-mismatch conditions, results of test PCM-5 // *American Nuclear Society meeting: San Francisco, CA, USA; 12–16 Nov. 1979.* 4 p.

*Статья поступила в редакцию 30 декабря 2020 г.,
после доработки — 27 января 2021 г.,
принята к публикации 5 февраля 2021 г.*