

УДК 536.423.1

DOI: 10.15372/PMTF202215173

## ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ ОТ СОПЛА ДО ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ ВЫНУЖДЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Т. А. Губанова\*, А. Р. Забиров\*,\*\*, И. А. Молотова\*,  
В. А. Рязанцев\*, В. В. Ягов\*

\* Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

\*\* Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mails: gubanova.ta@mail.ru, zabirov.arслан@gmail.com, MolotovalA@mpei.ru,

RiazantsevVA@mpei.ru, YagovVV@mpei.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса охлаждения циркониевого шара в недогретом этаноле под действием затопленной струи. В ходе экспериментов менялись степень недогрева охлаждаемой жидкости и расстояние от среза сопла до охлаждаемой поверхности. Представлены термограммы охлаждения и выявлено влияние расстояния между соплом и поверхностью на длительность охлаждения и температуру перехода от устойчивого пленочного кипения к интенсивному теплообмену.

**Ключевые слова:** теплообмен, кипение, нестационарное охлаждение, закалка, затопленная струя, расстояние от среза сопла до охлаждаемого образца

**Введение.** Струйное охлаждение широко применяется в технологиях закалки. Например, в [1] описана технология термоупрочнения рельсовой накладки путем струйного водяного охлаждения и разработано устройство для реализации регулируемого охлаждения рельсовых накладок. При обработке накладок в рабочем диапазоне режимов охлаждения получены механические характеристики материалов, соответствующие требованиям нормативной документации. В [2] разработано устройство контролируемого охлаждения. Возможность изменения скорости охлаждения в более широком диапазоне позволила обеспечить производство листов, в том числе высокопрочных, для судостроения и изготовления труб.

В монографии [3], посвященной современным проблемам закалки, отмечается, что с практической точки зрения классические методы закалки погружением не позволяют контролировать процессы охлаждения, в отличие от метода струйного охлаждения. Количество и расположение сопел в основном зависят от формы детали, подлежащей термообработке, и от желаемой эффективности охлаждения. В работе [3] также проведен анализ факторов, оказывающих влияние на процесс охлаждения металлических образцов затопленной струей, и сделано предположение о неустойчивости пленочного кипения вследствие воздействия струи жидкости. Отмечено также значительное увеличение эффективности охлаждения при недогреве жидкости и использовании низкотеплопроводных покрытий.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 20-79-10363).

© Губанова Т. А., Забиров А. Р., Молотова И. А., Рязанцев В. А., Ягов В. В., 2023

Результаты экспериментальных исследований возникновения микропузырькового режима кипения, впервые описанного в работе [4], свидетельствуют о высокой интенсивности теплообмена в данном режиме в отличие от режима устойчивого пленочного кипения. В работах [5, 6] представлены результаты охлаждения нержавеющей, никелевой и медной сфер в этаноле, воде и смесях вода — этанол, подтверждающие интенсифицирующее влияние затопленной струи на процесс теплообмена. Предположительно, данный эффект возникает вследствие механического воздействия струи на паровую пленку, что делает ее более тонкой, а следовательно, увеличивает число и общую площадь областей контакта жидкости с шероховатой поверхностью. Температура некоторых выступов может снижаться до значений, меньших заданной температуры  $T_{lim}$  (температуры предельного перегрева жидкости), что приводит к интенсификации процесса. Следует отметить, что во всех проведенных экспериментах толщина паровой пленки на поверхности не превышает  $100 \div 200$  мкм. Такая малая толщина, безусловно, способствует возникновению контактов жидкость — стенка. Так же, как в экспериментах в отсутствие воздействия струи, наблюдается зависимость интенсивности процесса от характеристик поверхности и охлаждающей жидкости.

Во многих работах указывается, что одним из основных параметров, оказывающих существенное влияние на качественные и количественные характеристики теплоотдачи при кипении жидкости на различных поверхностях, является расстояние  $h$  от сопла до рабочей поверхности. В работе [7], в которой рассматривается охлаждение теплонагруженных элементов радиоэлектронного оборудования струями фреона, показано, что максимальное влияние расстояния от канала до поверхности на плотность теплового потока  $q$  прослеживается до значения  $h = 8$  мм. При увеличении расстояния это влияние ослабевает. Максимальное значение плотности теплового потока  $q$  получено при  $h = 2$  мм. Это можно объяснить тем, что вследствие малого расстояния между подводящим каналом и поверхностью теплообмена большая часть хладагента попадает на рабочий участок, находясь в жидкой фазе. С увеличением  $h$ , наоборот, при приближении к поверхности часть фреона испаряется за счет взаимодействия с отходящими от рабочего участка более нагретыми парами фреона, и лишь часть жидкого рабочего тела достигает поверхности.

В работе [8] проводились эксперименты по струйному охлаждению жидким азотом и было установлено, что расстояние от среза сопла до поверхности оказывает существенное влияние на эффективность охлаждения даже в начале процесса. По мере уменьшения этого расстояния скорость охлаждения увеличивается, однако при достаточно малых значениях  $h$  увеличение скорости охлаждения не является очевидным. Значения коэффициента теплоотдачи как на начальной стадии, так и в дальнейшем значительно уменьшаются при увеличении расстояния от среза сопла до поверхности. Это обусловлено тем, что объемная доля жидкого азота резко уменьшается, когда он выбрасывается в атмосферу вследствие испарения жидкости, о чем свидетельствуют также данные CFD-анализа. Полученные результаты также позволяют сделать вывод, что регулирование расстояния  $h$  в процессе криогенной обработки значительно эффективнее, чем регулирование массового расхода жидкого азота.

В работе [9] показано, что в случае затопленных струй теплопередача не зависит от расстояния между соплом и поверхностью, когда сопло находится в непосредственной близости ( $h/d = 2 \div 3$ ,  $d$  — диаметр сопла) к нагретой поверхности. Также было установлено, что в отличие от случая свободных струйных потоков использование конфигурации затопленной струи при малом расстоянии между соплом и поверхностью теплообмена позволяет получить необходимые значения коэффициента теплопередачи при наименьшей мощности накачки. Аналогичные результаты представлены в работе [10]. В случае свободной струи влияние увеличения расстояния от сопла до нагретой пластины аналогично влиянию уве-

личения скорости струи. Плотность теплового потока возрастает по мере уменьшения расстояния между соплом и поверхностью. Предполагается, что в случае затопленной струи кипение пленки начинается при более низкой температуре поверхности, когда расстояние увеличивается. Интенсивность процесса кипения незначительно зависит от расстояния.

Для изучения влияния расстояния от сопла до поверхности на интенсивность процесса теплообмена необходимо учитывать зависимость скорости от данного параметра. Согласно [11] струя состоит из начального, переходного и основного участков. На начальном участке сохраняется ядро струи, скорость жидкости в котором одинакова. До конца начального участка скорость жидкости остается постоянной, а затем начинает уменьшаться. Диаметр затопленной струи увеличивается, а граница струи и окружающей жидкости представляет собой конус.

В работе [12] показано, что при малых расстояниях от среза сопла до преграды значительного смещения струи с окружающей жидкостью не происходит. На оси струи скорость остается неизменной на расстоянии от среза сопла  $x/h = 0,4$ . В области торможения потока ( $1 < r/d < 2$ ,  $r$  — радиальная координата струи ( $r = 0$  — ось струи)) скорость струи на стенке уменьшается до нуля. В окрестности области торможения существуют область пристенного течения и далее область отрыва потока. При увеличении расстояния от среза сопла до преграды на течение начинает оказывать влияние слой смещения. В сдвиговом слое струи присутствуют крупномасштабные вихревые структуры в форме тороидальных осесимметричных вихрей, зарождающихся на некотором расстоянии от среза сопла (порядка 1–2 его диаметров) и распространяющихся в слое смещения. Установлено, что крупномасштабные вихревые структуры оказывают существенное влияние на характеристики теплообмена.

В настоящей работе представлены экспериментальные данные об охлаждении циркониевого шара в недогретом этаноле при воздействии затопленной струи той же жидкости, исследовано влияние расстояния от сопла до поверхности на процесс пленочного кипения.

**Материалы и методы.** Эксперименты проводились на установке, подробное описание и схема которой приведены в работе [5]. Установка рассчитана на проведение экспериментов в условиях атмосферного давления. Основой установки является экспериментальная камера, представляющая собой емкость с охлаждающей жидкостью (этанолом). В ходе экспериментов рабочий участок перемещался внутрь катушки высокочастотного индуктора, где он нагревался в течение малого промежутка времени. С помощью специального механизма нагретый до температуры  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  образец погружался в жидкость на уровень сопла, через которое подается струя из устройства для впрыска. Для предотвращения воспламенения в опытах с этанолом образцы нагреваются до температуры не выше  $450 \div 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Момент отсчета времени совпадает с началом процесса охлаждения. Следует отметить, что подача струи начиналась в момент погружения образца. Температура жидкости в емкости регулировалась с помощью погруженного в нее медного змеевика, по которому циркулировал охлажденный в термостате теплоноситель. В процессе охлаждения сигнал от термопар поступал через коннектор NI SCXI-1303 на измерительный модуль 35 NI SCXI-1102, который является частью сборки на основе NI SCXI-1001. Результаты измерений через USB-интерфейс поступали на персональный компьютер, где в программе LabView отображалась зависимость температуры от времени. На рис. 1, 2 показаны компоновка термопар в циркониевом шаре и трехмерная модель устройства для впрыска жидкости.

В верхней точке шара диаметром 40 мм, изготовленного из циркония, просверливаются два сквозных отверстия диаметром приблизительно 1 мм для размещения кабеля с термоэлектродами. Термодатчики (см. рис. 1) размещаются в точках с полярными углами  $\alpha_1 = 90^{\circ}$ ,  $\alpha_2 = 120^{\circ}$ ; для центральной термопары в верхней части шара просверливает-

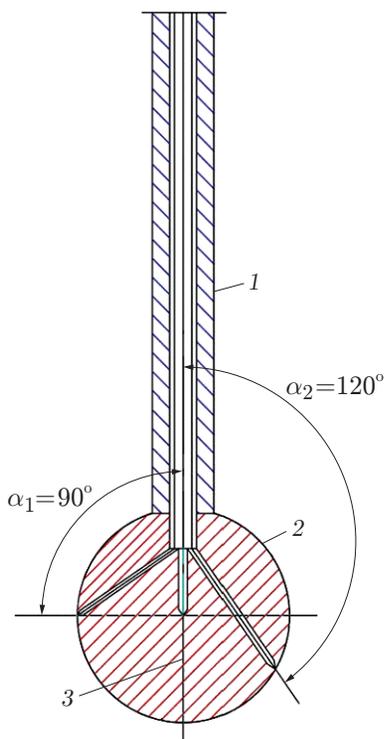


Рис. 1

Рис. 1. Схема экспериментального образца:

1 — трубка-державка, 2 — циркониевый шар, 3 — хромель-алюмелевые термопары

Рис. 2. Трехмерная модель устройства для впрыска жидкости:

1 — кронштейн, 2 — цилиндрический корпус, 3 — линейный актуатор, 4 — обратный клапан, 5 — сопло

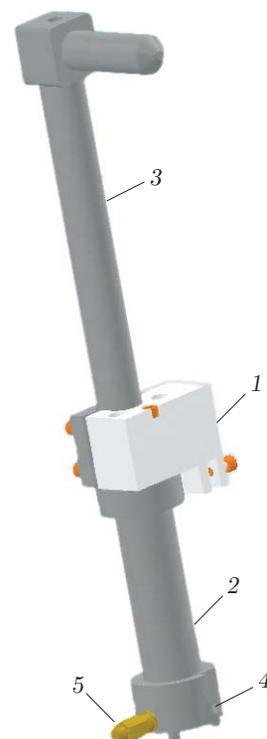


Рис. 2

ся дополнительный глухой канал. Точкой отсчета для углов является точка сопряжения трубки-державки и сферы. Хромель-алюмелевые термопары соединены через измерительный модуль и приварены с помощью лазерной сварки к поверхности охлаждаемого шара. Диаметр электродов равен 0,2 мм. Электроды термопары собираются в трубку-державку диаметром 5 мм. Державка сначала с помощью резьбы крепится на глубине 5 мм, затем с помощью лазерной сварки место ее сопряжения с шаром герметизируется. Такой способ заделки термодатчиков не оказывает влияния на процессы, происходящие на охлаждаемой поверхности [14]. Циркониевый шар был отполирован. Характерный размер шероховатости  $R_z$  (оценка по максимальной высоте выступа) полированных опытных образцов приблизительно равен 5 мкм, что соответствует шероховатости реальных технических поверхностей.

Устройство для дестабилизации пленочного кипения (см. рис. 2) крепится к экспериментальной камере с помощью кронштейна 1. Это устройство состоит из цилиндра 2, внутри которого движется поршень. Для дозированной подачи жидкости используется шаговый двигатель, который крепится к цилиндру. С помощью линейного актуатора 3 поршень поднимается, и рабочая жидкость всасывается в цилиндрический корпус устройства через обратный клапан 4. При обратном движении поршня жидкость выталкивается через сопло 5 в течение  $(28 \pm 1)$  с со скоростью порядка 10 м/с. Устройство включает также концевые оптические датчики, позволяющие останавливать двигатель, когда поршень достигает крайнего положения (160 мм). Процесс всасывания и выталкивания не

вызывает циркуляции охлаждающей жидкости в объеме. Внутренний диаметр сопла на выходе равен 1 мм. Устройство позволяет вводить жидкость той же температуры, что и в емкости, перпендикулярно поверхности образца с постоянной скоростью при охлаждении. Опыты проводились с 95,5 %-м этанолом, циркониевый шар нагревался до температуры 450 °С. Температура охлаждающей жидкости варьировалась в диапазоне  $T_{liq} = 30 \div 70$  °С. Расстояние от среза сопла до поверхности составляло  $h = 5; 10; 20; 30; 40; 50$  мм. Шар был жестко закреплен и не отклонялся в процессе охлаждения. Расстояние измерялось с точностью до 0,1 мм.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Следует отметить, что для 95,5 %-го этанола температура предельного перегрева (температура спинодали)  $T_{lim} = 195$  °С, критическая температура  $T_{cr} = 241$  °С. Температуру, при которой происходит переход в режим интенсивного теплообмена  $T_{tr}$ , можно оценить как на основе визуального анализа термограмм, так и на основе анализа кривой кипения (зависимости теплового потока от температурного напора). В настоящей работе использовался первый способ: температура перехода определялась как среднее значение температуры поверхности в точках перегиба термограммы, где скорость охлаждения значительно меняется. На рис. 3 приведены термограммы, полученные различными термопарами при различных значениях недогрева жидкости до температуры насыщения  $\Delta T_{sub} = T_s - T_{liq}$ . Видно, что области термопары с полярным углом  $\alpha_2 = 120^\circ$  температура  $T_{tr}$  приблизительно равна начальной температуре образца, а в области термопары с углом  $\alpha_1 = 90^\circ$   $T_{tr}$  близка к критической температуре этанола. Также на рис. 3 видно, что недогрев является одним из важнейших факторов, влияющих на интенсивность процесса охлаждения. Анализ представленных термограмм показывает, что струя попадает в область, где установлена термопара с полярным углом  $\alpha = 120^\circ$ . Следует отметить, что термограммы на рис. 3, а, б существенно различаются; при увеличении недогрева длительность процесса уменьшилась практически в три раза.

Показания термопары с углом  $\alpha_1 = 90^\circ$  и центральной термопары аналогичны термограммам, полученным в опытах в отсутствие затопленной струи, однако продолжитель-

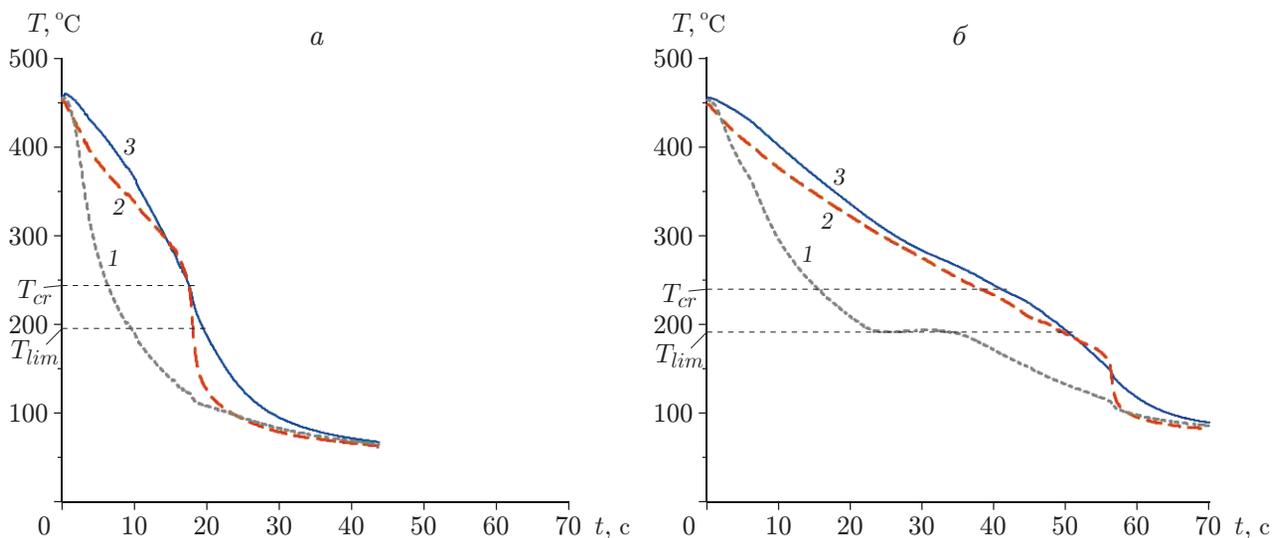


Рис. 3. Термограммы охлаждения циркониевого шара в этаноле при различных значениях температуры недогрева и начального перегрева образца, зафиксированные различными термопарами:

а —  $\Delta T_{sub} = 50$  °С,  $T_0 = 420$  °С; б —  $\Delta T_{sub} = 10$  °С,  $T_0 = 380$  °С; 1 — термопара с углом  $\alpha_2 = 120^\circ$ , 2 — термопара с углом  $\alpha_1 = 90^\circ$ , 3 — центральная термопара

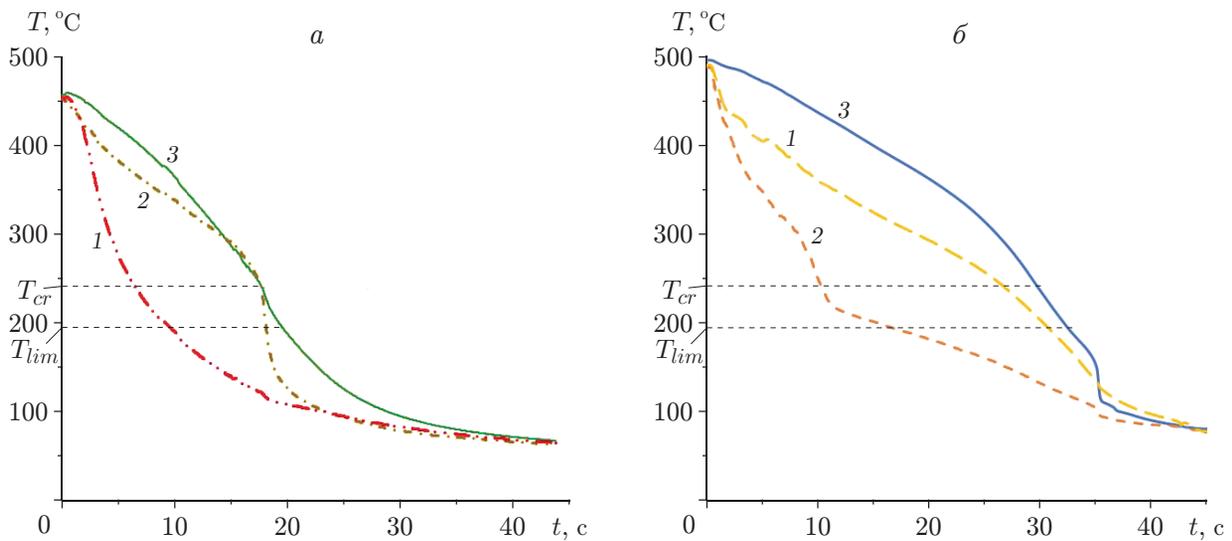


Рис. 4. Термограммы охлаждения сферических образцов в этаноле при температуре  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и начальном перегреве  $T_0 = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ , зафиксированные различными термопарами:

*a* — циркониевый шар, *б* — никелевый шар; 1 — термопара с углом  $\alpha_2 = 120^{\circ}$ , 2 — термопара с углом  $\alpha_1 = 90^{\circ}$ , 3 — центральная термопара

ность охлаждения существенно сократилась по сравнению со случаем свободного течения жидкости. Температура перехода в режим интенсивного теплообмена  $T_{tr}$  равна начальной температуре образца в области термопары с углом  $\alpha_1 = 120^{\circ}$ . На рис. 3, б виден излом, вызванный прекращением подачи струи: интенсивность процесса резко уменьшилась, однако режим интенсивного теплообмена сохранился. По показаниям двух других термопар можно сделать вывод, что температура  $T_{tr}$  близка к температуре  $T_{lim}$  ( $195\text{ }^{\circ}\text{C}$  для 95,5 %-го этанола). Это означает, что в области попадания струи на поверхность (термопара с углом  $\alpha_2 = 120^{\circ}$ ) в течение всего эксперимента имел место интенсивный режим теплообмена, а в области термопары с углом  $\alpha_1 = 90^{\circ}$  наблюдался устойчивый режим пленочного кипения.

Далее рассмотрим влияние характеристик охлаждаемой поверхности на процесс охлаждения. На рис. 4 представлены термограммы для шаров из циркония и никеля [5].

Термограммы охлаждения шара в этаноле при температуре  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T_{sub} = 48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) показывают, что в случае циркониевого шара струя попадает в область на поверхности, где установлена термопара с полярным углом  $\alpha_2 = 120^{\circ}$ , в случае никелевого шара — в область термопары с углом  $\alpha_1 = 90^{\circ}$ . Как и предполагалось, процесс охлаждения шара из циркония происходит более интенсивно, чем процесс охлаждения шара из никеля (более высокая температура  $T_{tr}$  и меньшая продолжительность), что обусловлено низкой теплопроводностью металла. При этом температура начального нагрева никелевого шара на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  больше, чем циркониевого.

На рис. 5 представлены показания термопар с углами  $120^{\circ}$  и  $90^{\circ}$  (область удара струи и область устойчивого пленочного кипения соответственно) в опытах по охлаждению циркониевого образца в этаноле при температуре  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T_{sub} = 48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) на различных расстояниях от поверхности до среза сопла.

В области, где реализуется более устойчивый режим пленочного кипения (см. рис. 5, а), температура  $T_{tr}$  близка к критической температуре  $T_{cr}$  (для этанола  $T_{cr} = 241\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). При расстояниях  $h = 5; 10; 20\text{ мм}$  термограммы практически идентичны. Следует отметить, что с увеличением расстояния между соплом и поверхностью  $T_{tr}$  уменьшается с  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$

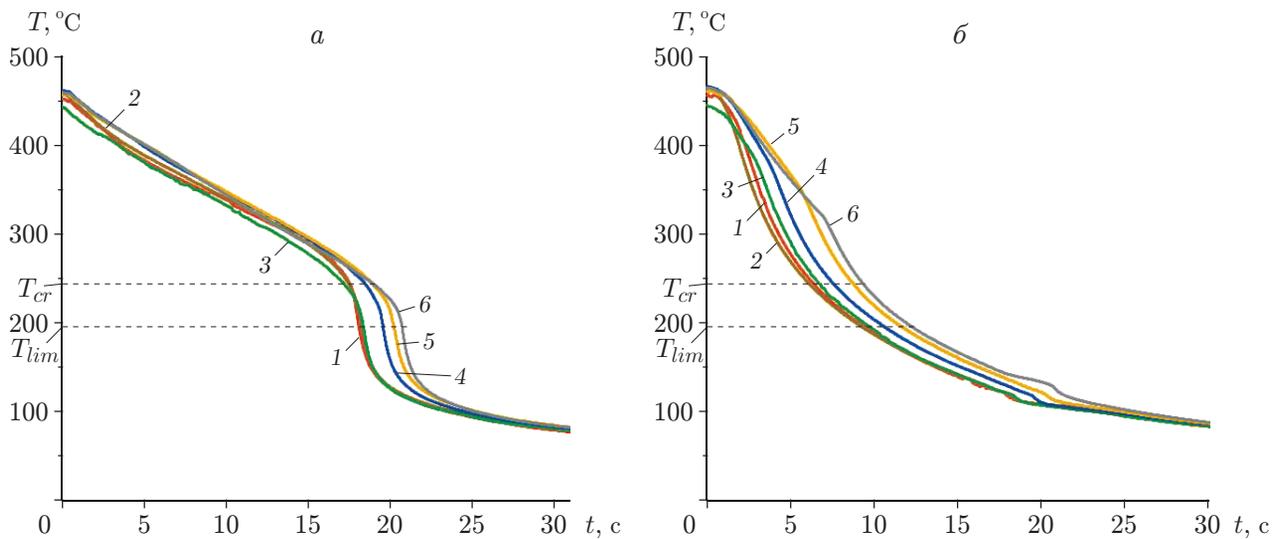


Рис. 5. Термограммы охлаждения циркониевого шара в этаноле при температуре  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , начальном перегреве образца  $T_0 = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$  и различных расстояниях от поверхности до среза сопла, зафиксированные различными термопарами: *a* — термопара с углом  $\alpha_1 = 90^{\circ}$ , *б* — термопара с углом  $\alpha_2 = 120^{\circ}$ ; 1 —  $h = 5\text{ мм}$ , 2 —  $h = 10\text{ мм}$ , 3 —  $h = 20\text{ мм}$ , 4 —  $h = 30\text{ мм}$ , 5 —  $h = 40\text{ мм}$ , 6 —  $h = 50\text{ мм}$

при  $h = 5\text{ мм}$  до  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $h = 50\text{ мм}$ . В области предположительного удара струи о поверхность (см. рис. 5,б)  $T_{tr}$  близка к начальной температуре образца. Тем не менее при таком недогреве существенных различий термограмм не наблюдается, т. е. влияние расстояния между соплом и поверхностью на процесс охлаждения не является значительным. При охлаждении того же шара в этаноле, недогретом на  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , картина охлаждения аналогична, термограммы довольно близки, за исключением результатов охлаждения при наибольшем расстоянии. При  $h = 5 \div 40\text{ мм}$  время охлаждения приблизительно такое же ( $t \approx 29\text{ с}$ ), при  $h = 50\text{ мм}$  оно увеличилось на  $7\text{ с}$ . Кроме того, температура  $T_{tr}$  уменьшалась с увеличением расстояния. При  $h = 5 \div 40\text{ мм}$   $T_{lim} < T_{tr} < T_{cr}$ . При  $h = 50\text{ мм}$   $T_{tr} = T_{lim}$ , что исключает наличие микропузырькового кипения. Влияние расстояния между соплом и поверхностью на процесс охлаждения можно наблюдать при охлаждении циркониевого шара в слабо недогретой жидкости ( $\Delta T_{sub} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (рис. 6).

На рис. 6,а видно, что  $T_{tr} < T_{lim}$  при любых расстояниях  $h$ . В этой области существует только устойчивый режим пленочного кипения. В области удара струи (близком к положению термопары с углом  $\alpha_2 = 120^{\circ}$ ) быстрый переход к интенсивному режиму теплообмена наблюдается только при  $h = 5; 10\text{ мм}$ . На рис. 6,б при больших расстояниях  $T_{tr} \approx T_{lim}$ , термограммы близки к термограммам, представленным на рис. 6,а для тех же расстояний. В отличие от экспериментов в этаноле с различной температурой ( $30$  и  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) температурные зависимости для различных расстояний между соплом и поверхностью существенно различаются. Наиболее интенсивным является процесс охлаждения при  $h = 10\text{ мм}$ .

**Заключение.** В работе представлены результаты новых экспериментальных исследований охлаждения циркониевого шара в недогретом этаноле. Подтверждено значительное влияние на процесс охлаждения температуры недогрева жидкости и теплофизических характеристик охлаждаемого образца. Интенсивность процесса увеличивается при использовании поверхностей с меньшей теплопроводностью и сильно недогретых жидкостей. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие влияние такого параметра, как

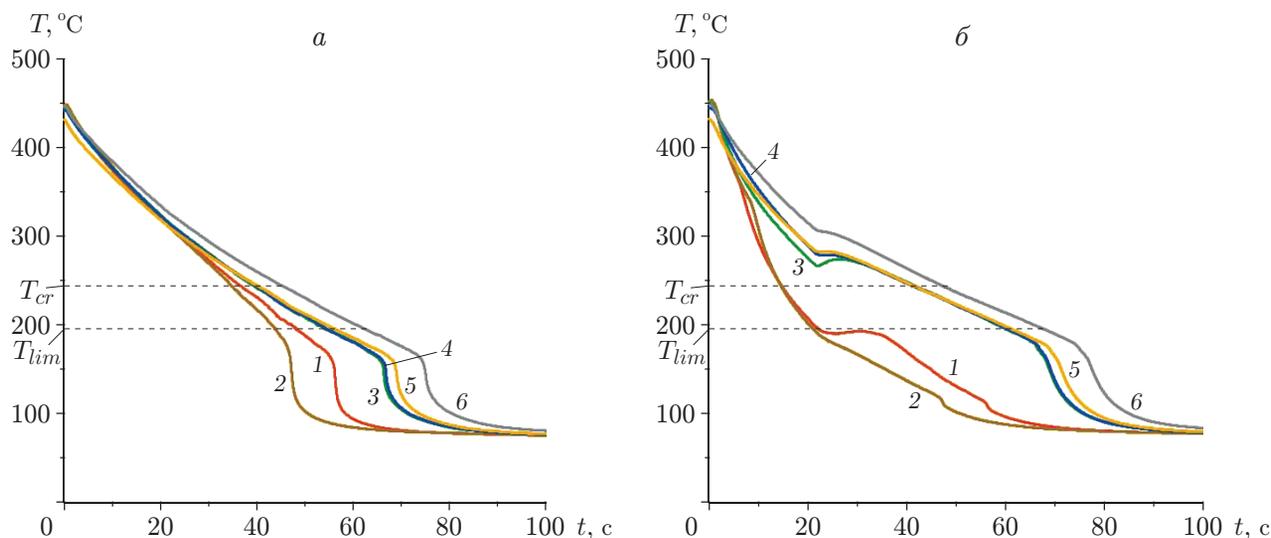


Рис. 6. Термограммы охлаждения циркониевого шара в этаноле при температуре 70 °С, начальном перегреве образца  $T_0 = 380$  °С и различных расстояниях от поверхности до сопла, зафиксированные различными термопарами:

*a* — термопара с углом  $\alpha_1 = 90^\circ$ , *б* — термопара с углом  $\alpha_2 = 120^\circ$ ; 1 —  $h = 5$  мм, 2 —  $h = 10$  мм, 3 —  $h = 20$  мм, 4 —  $h = 30$  мм, 5 —  $h = 40$  мм, 6 —  $h = 50$  мм

расстояние между соплом и поверхностью, на процессы нестационарного пленочного кипения. При сильном недогреве влияние данного расстояния незначительно вследствие очень высокой интенсивности охлаждения при таком сочетании характеристик образца и охлаждающей жидкости. В случае охлаждения циркониевого шара в слабо недогретом этаноле влияние расстояния между соплом и поверхностью более существенно. При расстоянии более 10 мм быстрого перехода к интенсивному режиму теплообмена не наблюдалось. Влияние расстояния между соплом и поверхностью объясняется тем, что скорость затопленной струи существенно уменьшается с увеличением этого расстояния. При этом наличие на сфере паровой пленки не оказывает существенного влияния на профиль скорости струи ввиду ее малой ( $\approx 100$  мкм) толщины. В основном потеря скорости происходит вследствие вовлечения жидкости из окружающей среды и перемешивания с ней. В дальнейшем аналогичные эксперименты следует провести на материалах с большей теплопроводностью, для которых влияние расстояния от сопла до поверхности, вероятно, более существенно.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Липунов Ю. И., Эйсмонт К. Ю., Ярошенко Ю. Г. и др. Термоупрочнение рельсовой накладке струйным водяным охлаждением // Сталь. 2014. № 8. С. 88–91.
2. Липунов Ю. И., Траянов Г. Г., Эйсмонт К. Ю. Разработка систем регулируемого охлаждения и технологий термоупрочнения // Сталь. 2010. № 3. С. 96–99.
3. Liscic B. Quenching theory and technology. Boca Raton: CRC Press, 2010.
4. Aziz S., Hewitt G. F., Kenning D. I. Heat transfer regimes in forced-convection film boiling on spheres // Proc. of the 8th Intern. heat transfer conf., San Francisco (USA), 17–22 Aug. 1986. [Electron. resource]. S. l.: Begel House Inc., 1986. P. 2149–2154. DOI: 10.1615/IHTC8.700.

5. **Kanin P. K., Gubanova T. A., Zabirov A. R., et al.** An experimental investigation of film boiling with submerged impinging jet // Proc. of the 3rd Intern. youth conf. on radio electronics, electrical and power engng (REEPE), Moscow (Russia), 11–13 Mar. 2021. [Electron. resource]. 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/reepe51337.2021.9388028.
6. **Kanin P. K., Gubanova T. A., Zabirov A. R., Yagov V. V.** Investigating the effect of submerged impingement jet on heat transfer in water-alcohol mixtures // J. Phys. Conf. Ser. IOP Publ. 2021. V. 2057, N 1. 012037.
7. **Лопатин А. А., Гортышов Ю. Ф.** К вопросу об охлаждении теплонагруженных элементов радиоэлектронного оборудования импактными струями фреона // Вестн. Сам. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. № 3-1. С. 349–358.
8. **Wang Y., Dai M., Liu K., et al.** Research on surface heat transfer mechanism of liquid nitrogen jet cooling in cryogenic machining // Appl. Thermal Engng. 2020. V. 179. 115607.
9. **Robinson A. J., Schnitzler E.** An experimental investigation of free and submerged miniature liquid jet array impingement heat transfer // Experim. Thermal Fluid Sci. 2007. V. 32. P. 1–13.
10. **Robidou H., Auracher H., Gardin P., Lebouché M.** Controlled cooling of a hot plate with a water jet // Experim. Thermal Fluid Sci. 2002. V. 26. P. 123–129.
11. **Абрамович Г. Н.** Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960.
12. **Волков К. Н.** Взаимодействие круглой турбулентной струи с плоской преградой // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 1. С. 55–67.
13. **Штерцер А. А., Гринберг Б. Е.** Воздействие гидроабразивной струи на материал: гидроабразивный износ // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 3. С. 191–201.
14. **Забиров А. Р., Молотова И. А., Беляев И. А. и др.** О способах заделки термопар в экспериментальных исследованиях охлаждения высокотемпературных тел в недогретых и насыщенных жидкостях // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 3. С. 475–483.

*Поступила в редакцию 20/VII 2022 г.,  
после доработки — 12/XII 2022 г.  
Принята к публикации 26/XII 2022 г.*

---