

УДК 536.248.2

Об интенсификации нестационарного теплообмена при кипении на поверхности пластины с низкотеплопроводными покрытиями*

А.Н. Цой, А.Н. Павленко

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: tsoialexei@ngs.ru

Проведено экспериментальное исследование нестационарного охлаждения в жидком азоте сильно перегретой медной пластины с низкотеплопроводными покрытиями в диапазоне изменения их толщины от 0,09 до 0,67 мм. Показано, что наличие низкотеплопроводного покрытия оказывает существенное влияние на характер температурных кривых и полное время охлаждения пластины. Анализ опытных данных выявил, что наиболее значительное снижение общего времени охлаждения пластины в 2,6 раза по сравнению со случаем без покрытия достигается при толщине низкотеплопроводного слоя 0,09 мм.

Ключевые слова: пленочное кипение, пузырьковый режим, нестационарный теплообмен, жидкий азот, низкотеплопроводное покрытие, коэффициент теплоотдачи, темп охлаждения.

Введение

Проблемы быстрого охлаждения сильно перегретых тел вскипающей жидкостью важны для ряда технологических процессов и обеспечения безопасной устойчивой работы энергетического оборудования. Такие задачи встают при расчетах режимов прямого охлаждения ТВЭЛов в реакторах при аварии в контуре подачи охлаждающей воды, термостабилизации участков сверхпроводящего кабеля (низкотемпературного или высокотемпературного) при локальной потере сверхпроводящего состояния, захолаживании криогенных систем при заливке жидкими криоагентами, а также в процессах быстрой закалки в металлургии, в т.ч. жидким азотом.

В атомной энергетике при исследовании аварийных режимов в активных зонах повторный залив исследуется применительно к вопросам безопасности уже на протяжении многих лет [1, 2]. Режимы повторного смачивания оказывают существенное влияние на динамику охлаждения перегретых поверхностей в пищевой промышленности, на нестационарный теплообмен в энергетических аппаратах и в системах термостабилизации различного назначения [3, 4]. Поиск новых способов интенсификации теплообмена при кипении в условиях существенной неизотермичности теплоотдающей поверхности актуален, например, для более высокоэффективного охлаждения резцов при металлообработке,

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-03221-а) и Программы фундаментальных исследований СО РАН (проект № III.18.2.3)

а также в ряде других случаев в технологиях и в устройствах, где жидкость приходит в контакт с сильно нагретым твердым телом или жидкость необходимо быстро нагреть нагревателем.

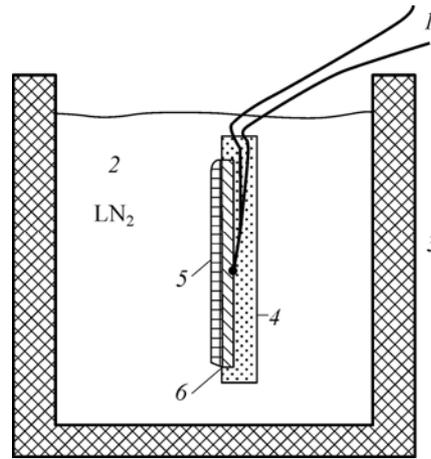
Процессы теплообмена при смене пленочного и пузырькового режимов кипения исследовались во многих работах. Результаты детальных экспериментальных исследований и численного моделирования динамики смены режимов кипения, тепловой устойчивости локальных очагов пленочного кипения приведены, например, в работах [5–7]. В работах [8, 9] представлены результаты исследований динамики повторного смачивания сильно перегретых поверхностей стекающими пленками жидкости. Результаты экспериментов на криогенных жидкостях, в частности, проведенных при нанесении низкотеплопроводных покрытий на греющие поверхности, приведены в работах [3, 10, 11]. Авторами [3] было показано, что время полного охлаждения образца можно существенно изменить при нанесении на металлическую поверхность низкотеплопроводного покрытия ФП-734 за счет изменения положения точки второго кризиса теплоотдачи на кривой охлаждения ([3], с. 89), вслед за прохождением которой начинается быстрое снижение температуры. Из анализа зависимости температуры металла (стальной трубки) от времени при захолаживании в азоте по данным работы [12] следует, что время полного охлаждения существенно уменьшается не за счет сдвига кривых $T = T(t)$ на участке пленочного кипения, а за счет разрушения паровой пленки при более высокой температуре. В работах [13, 14] исследовались процессы теплообмена между медной сферой и жидким азотом. Поверхность теплообмена модифицировалась её покрытием низкотеплопроводным слоем фторопласта и нанесением сферических углублений на ней. В работе [15] покрытие было выполнено в виде слоя инея из паров воды, осажденных на предварительно охлажденный образец. Здесь же наблюдалось почти шестикратное уменьшение времени охлаждения образца в жидком азоте.

При охлаждении сильно перегретых тел нестационарный процесс передачи тепла на границе твердое тело–жидкость при больших температурных напорах проходит, как правило, последовательно через стадии пленочного, переходного, пузырькового режимов кипения и конвективного теплообмена. Если на поверхности тела организовать зоны, на которых температура по каким-либо причинам быстро снизится до температуры смачивания T_{wet} , над которыми начинает развиваться пузырьковый режим кипения (T_{wet} близка к T_L — температуре Лейденфроста и к T_{lim} — температуре предельного перегрева [16, 17]), то общее время охлаждения значительно уменьшится, так как локальный тепловой поток при пузырьковом режиме кипения будет существенно больше, чем при пленочном. Организовать такое развитие теплообмена можно структурированием теплоотдающей поверхности или нанесением различных покрытий. Структурирование может быть достигнуто оребрением, в т.ч. в микро- или наномасштабе, наличием спиц, выступов, или созданием различных капиллярно-пористых структур. Такие структуры в этом случае должны иметь специальное профилирование, градиентные смачивающие свойства и существенно более низкую теплопроводность материала для создания условий более раннего распада пленочного режима кипения и развития зон высокоэффективного пузырькового режима кипения. В частности, к поверхности охлаждаемого тела (или к ее части) можно приварить мелкочаистую сетку или покрыть поверхность теплообмена материалом с низкой теплопроводностью. В этом случае над поверхностью элементов покрытия пузырьковый режим будет локально возникать существенно раньше, чем на нагревателе без покрытия. В качестве таких покрытий могут быть использованы клей, намазка, масляные пленки, плазменное напыление тонких слоев и т.п.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение влияния толщины низкотеплопроводного покрытия на скорость охлаждения перегретой медной пластины в жидком азоте.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — термопара, 2 — жидкий азот, 3 — сосуд Дьюара, 4 — теплоизоляция, 5 — низкотеплопроводное покрытие, 6 — вертикально ориентированная медная пластина.



Экспериментальная установка и методика

В ходе экспериментов регистрировалась зависимость от времени температуры медной пластины, быстро погружаемой в жидкий азот в вертикальном положении. В опытах исследовалось захлаживание медной пластины размером $3,3 \times 6,5 \text{ см}^2$ и толщиной 2 мм. На пластину наносился ровный слой смазки Рамзая (вакуумная смазка, состоящая из смеси вазелина, парафина и каучука, ГОСТ 9645-61). Отметим, что при температуре 77 К смазка Рамзая становится весьма твердой и кипение жидкого азота не производит механических изменений на ее поверхности.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Медь–константовая термопара 1 припаивалась к пластине 6 по центру. После этого пластина была заделана заподлицо в брусок из пенопласта 4 размерами $6 \times 9 \times 3 \text{ см}^3$. Глубина распространения температурного фронта в пенопласте за максимальное время опытов 75 с составляет около 6 мм, поэтому для использованных размеров и времен переходных процессов потери тепла через пенопластовый брусок пренебрежимо малы. Обратная сторона пластины с термопарой была обращена к пенопласту. Для предотвращения подтекания на нее азота применялся силиконовый герметик. Лицевая сторона, на которую наносился слой смазки 5, контактировала с жидким азотом. Перед нанесением смазки сборка с термопарой взвешивалась с точностью $\pm 0,01 \text{ г}$. После нанесения слоя сборка взвешивалась еще раз. Толщина покрытия определялась весовым способом с использованием табличных данных для плотности смазки и величины площади поверхности. Значения толщины низкотеплопроводного слоя δ в опытах равнялись 0,09, 0,25, 0,48, 0,67 мм. Для обеспечения сравнительной базы были проведены аналогичные опыты на пластине без покрытия. Рабочий участок нагревался до начальной температуры 301,2 К и затем быстро опускался в сосуд Дьюара 3 в вертикальном положении. Одновременно начиналась запись сигнала термопары, продолжавшаяся до момента, когда процесс охлаждения заведомо заканчивался. После этого пластина вынималась и отогревалась. Далее на нее наносился новый слой смазки другой толщины, и процедура повторялась. Измерение термоЭДС проводилось с частотой 50 Гц и с точностью до 0,5 %. Второй спай термопары находился в термостате в тающем льде. Пересчет полученных величин термоЭДС в значения температуры проводился по стандартным таблицам с коррекцией градуировки в точках 77,4 К (кипение жидкого азота) и 301,2 К (по образцовому термометру с точностью $\pm 0,1 \text{ К}$), что позволило регистрировать температуру в нестационарных режимах охлаждения с точностью до $\pm 1 \text{ К}$.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены результаты измерений температур исследуемых образцов в процессе охлаждения в жидком азоте. Из анализа представленных опытных данных следует, что характер и темп снижения температуры в переходном режиме существенно зависят от наличия низкотеплопроводного покрытия и его толщины. Температурные кривые 2, 3, 4, 5 на графике, соответствующие различным значениям толщины покрытия,

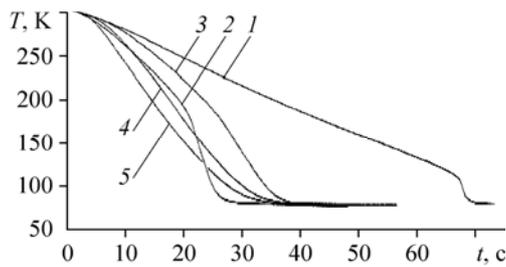


Рис. 2. Зависимость температуры пластины от времени в процессе охлаждения.

Пластина без покрытия (1), $\delta = 0,09$ (2), $0,25$ (3), $0,48$ (4), $0,67$ (5) мм; температура пластины при переходе к пузырьковому режиму кипения: $113,8$ (1), 192 (2) К.

показывают существенное ускорение (в 2–3 раза) процесса охлаждения по сравнению с результатами, полученными в опыте для пластины без покрытия (кривая 1). На кривых 1, 2, 3 наблюдаются изломы, отражающие смену режима кипения от пленочного к пузырьковому. На кривых 4 и 5, соответствующих наибольшим в проведенных опытах значениям толщины покрытия, изломы явно не выражены. Тем не менее очевидно, что смена режимов кипения на поверхностях с данными толщинами покрытия также происходит. По-видимому, в данных условиях процесс распада пленочного режима кипения в различных локальных зонах теплоотдающей поверхности происходит более хаотично и сильнее растянут во времени. Более плавное нерегулярное возникновение и развитие локальных очагов переходного и пузырькового режимов кипения в этом случае приводит к не столь резкому изменению величины осредненного по поверхности коэффициента теплоотдачи в процессе снижения температуры пластины. Большая доля «островков» с переходным режимом кипения обусловлена низкими значениями локальной плотности теплового потока из-за высокого термического сопротивления низкотеплопроводного покрытия, лимитирующего подвод тепла к теплоотдающей поверхности в этих зонах. В связи с этим, как это следует из данных теоретического исследования [18], резко уменьшается и скорость распространения границ зон пузырькового режима кипения, что также ослабляет темп снижения температуры пластины.

Таким образом, наблюдаемое в проведенных опытах значительное снижение общего времени охлаждения пластин с покрытиями обусловлено распадом пленочного режима кипения при более высоких значениях температуры пластины. Наличие термосопротивления низкотеплопроводного покрытия приводит к более быстрому снижению температуры на контактирующей с пленкой пара поверхностью и, соответственно, к более раннему достижению температуры, при которой начинается распад пленочного кипения. Резкое увеличение коэффициента теплоотдачи при дальнейшем переходе к переходному и пузырьковому режимам кипения объясняет ускорение темпа охлаждения пластины с покрытиями. Как видно из рис. 2, точка излома на температурной зависимости для пластины с покрытием толщиной $\delta = 0,09$ мм, для которой общее время охлаждения оказалось минимальным, достигается при максимальной температуре нагревателя — $T_{\text{char}} = 192$ К для кривой 2. Очевидно, существует толщина покрытия, дающая наибольший эффект по скорости охлаждения, когда происходит наиболее раннее прекращение пленочного режима кипения с быстрым распространением очагов пузырькового режима.

В работе [19] авторами приведена расчетная зависимость для определения температуры T_{wet} , начиная с которой при охлаждении горячего тела происходит смачивание поверхности нагревателя в жидком азоте:

$$T_{\text{wet}}/T_c = A + 0,13 \cdot p/p_c, \quad (1)$$

здесь T_c и p_c — критические значения температуры и давления. Согласно исследованиям [19] для значений константы $A = 0,872$ и $0,916$ по этому расчету при атмосферном давлении получим $T_{\text{wet}} = 110,1$ и $115,6$ К соответственно. По данным, представленным на рис. 2 (кривая 1), расчет по (1) дает значение температуры $T_{\text{wet}} = 113,8 \pm 0,5$ К. Полагая, что на медной поверхности и на поверхности с покрытием распад пленочного кипения

происходит при аналогичных параметрах, т.е. значения температуры T_{wet} для них близки, можно оценить характерную плотность теплового потока в момент инициирования пузырькового режима кипения в предположении квазистационарности процесса из простого соотношения: $q = \lambda \cdot (T_{\text{solid}} - T_{\text{wet}}) / \delta$. Подстановка значений $T_{\text{wet}} = 113,8$ К и $T_{\text{solid}} = 192$ К для слоя 0,09 мм и коэффициента теплопроводности покрытия $\lambda = 0,12$ Вт/(м·К) (парафин, [20]) дает значение $q \approx 11 \cdot 10^4$ Вт/м², что хорошо согласуется со значениями величины первой критической плотности теплового потока при кипении азота на низкотеплопроводных нагревателях (фторопласт, нержавеющая сталь [10, 21]).

Следует отметить, что ввиду высокой смачиваемости жидким азотом как медной поверхности, так и покрытия из вакуумной смазки Рамзая факторы влияния смачиваемости (см., например, [22]) на динамику развития данных переходных процессов, по-видимому, не являются существенными.

Заключение

Представлены новые результаты экспериментального исследования нестационарного охлаждения в жидком азоте сильно перегретой медной пластины с низкотеплопроводными покрытиями различной толщины. Показано, что наличие низкотеплопроводных покрытий оказывает существенное влияние на характер температурных кривых и полное время охлаждения пластины. Выявлено, что наиболее значительное снижение общего времени охлаждения пластины по сравнению со случаем без покрытия достигается при минимальном значении использованных в опытах толщин низкотеплопроводного слоя. Из анализа полученных результатов следует, что интенсивное охлаждение перегретой пластины с низкотеплопроводными покрытиями обусловлено распадом пленочного кипения при более высоких температурных напорах и быстрым возникновением и развитием зон пузырькового кипения на теплоотдающей поверхности.

Полученные результаты могут быть полезны при конструировании теплообменных поверхностей различных устройств для управления процессами смены режимов пленочного и пузырькового кипения с целью повышения интенсивности охлаждения. Для интенсификации нестационарного теплообмена в таких переходных процессах следует, например, предусматривать кондуктивно связанные участки-покрытия из материалов с низкой теплопроводностью для создания упорядоченных локальных зон, обеспечивающих быстрое развитие высокоэффективного пузырькового режима кипения при высоких температурных напорах.

Список литературы

1. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалёв С.А., Соловьёв С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках: уч. пособие, 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 548 с.
2. Базюк С.С., Попов Е.Б., Паршин Н.Я., Кузма-Кичта Ю.А. Исследование повторного залива модельной ТВС ВВЭР // Тепловые процессы в технике. 2010. Т. 4, № 12. 546 с.
3. Кириченко Ю.А., Козлов С.М., Русанов К.В., Серегин В.Е., Троянов О. М., Тюрина Е. Г. Теплообмен при кипении азота и вопросы охлаждения высокотемпературных сверхпроводников. Киев: Наукова думка, 1992. 277 с.
4. Альтов В.А., Зенкевич В.Б., Кремлёв М.Г., Сычёв В.В. Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем. М.: Изд-во МЭИ, 2008. 464 с.
5. Hammad J., Mitsutake Y., Monde M. Movement of maximum heat flux and wetting front during quenching of hot cylindrical block // Proc. of the Intern. Symp. on Transient Convective Heat and Mass Transfer in Single and Two-Phase Flows / Ed. J. Padet, F. Arinc. Izmir: Begell House, 2003. P. 189–202.
6. Павленко А.Н., Стародубцева И.П., Суртаев А.С. Особенности эволюции сухих пятен при пленочном течении криогенных жидкостей в условиях нестационарного тепловыделения // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 4. С. 535–544.
7. Павленко А.Н., Суртаев А.С., Мацех А.М. Переходные процессы в стекающих пленках жидкости при нестационарном тепловыделении // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45, № 6. С. 905–916.

8. Стародубцева И.П., Павленко А.Н., Володин О.А., Суртаев А.С. Особенности динамики повторного смачивания перегретой поверхности стекающей криогенной пленкой жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 3. С. 347–357.
9. Павленко А.Н., Суртаев А.С., Цой А.Н., Стародубцева И.П., Сердюков В.С. Динамика повторного смачивания перегретой поверхности стекающей пленкой жидкости // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 6. С. 886–894.
10. Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977. 289 с.
11. Кошкин В.К., Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Нестационарный теплообмен. М.: Машиностроение, 1973. 328 с.
12. Пронько В.Г., Буланова Л.Б. Результаты экспериментального исследования термодинамического кризиса пленочного кипения // Инж.-физ. журн. 1978. Т. 34, № 5. С. 785–791.
13. Zhukov V.M., Kuzma-Kichta Yu.A., Agal'tsov A.M. // Investigation of nonstationary heat transfer in boiling of freon 113 on dimpled spherical and cylindrical surfaces under the conditions of free convection // Heat Transfer Research. 2010. Vol. 41, No. 4. P. 479–491.
14. Zhukov V., Kuzma-Kichta Yu., Lenkov V., Lavrikov A., Shustov M. Enhancement of heat transfer at transient and film boiling of nitrogen on spheres with dimples and low conductivity coating // Proc. of the 15-th Intern. Heat Transfer Conf., IHTC15-9224, 2014, Kyoto, Japan.
15. Mazor G., Korin E., Nemirovsky D., Ladizhensky I. Frost formation as a temporary enhancer for quench pool boiling // Applied Thermal Engng. 2013. Vol. 52, No. 2. P. 345–352.
16. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972, 312 с.
17. Цой А.Н., Кондаурова Л.П. Вскипание азота при нестационарном тепловыделении при различных давлениях // Инж.-физ. журн. 1990. Т. 58, № 2. С. 188–190.
18. Starodubtseva I.P., Pavlenko A.N. The evolution of temperature disturbances during boiling of cryogenic liquids on heat-releasing surfaces // Chapter in «Heat Transfer / Book 3», ISBN 978-953-307-583-9. INTECH. 2011. P. 513–541.
19. Simon F.F., Papell S.S., Simoneau R.J. Minimum film-boiling heat flux in vertical flow of liquid nitrogen // NASA Technical Note D-4307. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1968. 35 p.
20. Таблицы физических величин. Справочник // под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
21. Веркин Б.И., Кириченко Ю.А., Русанов К.В. Теплообмен при кипении криогенных жидкостей. Киев: Наукова думка, 1987. 264 с.
22. Vakarelski I.U., Patankar N.A., Marston J.O., Chan D.Y., Thoroddsen S.T. Stabilization of leidenfrost vapour layer by textured super hydrophobic surfaces // Nature. 2012. Vol. 489. P. 274–277.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2015 г.