

УДК 536.24

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ НА НЕОДНОРОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

© 2011 г. А. А. Еронин, С. П. Малышенко, А. И. Журавлев

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

E-mail: h2lab@mail.ru, litp@iht.mpei.ac.ru

Поступила в редакцию 21.12.2009 г.

Экспериментально исследованы особенности теплообмена и гидродинамики при кипении азота на поверхностях с различными типами неоднородностей в условиях воздействия внешних электрических полей. Показано, что основным механизмом интенсификации теплообмена является образование полевых ловушек и вызванное этим эффектом существенное изменение гидродинамики двухфазных течений вблизи обогреваемой поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] исследованы размерные эффекты при локальном теплообмене при кипении жидкого азота в электрическом поле. Показано, что характерные размеры неоднородностей обогреваемой поверхности, приводящих к образованию полевых ловушек и интенсификации локального теплообмена, соответствуют размерам порядка 1.5–3 отрывных диаметров пузырей при пузырьковом кипении на начальном участке кривой кипения.

В настоящей работе исследуется возможность интенсификации осредненных по поверхности параметров теплообмена при кипении во внешнем электрическом поле путем создания упорядоченной системы неоднородностей на обогреваемой поверхности. Наиболее простые их конфигурации создаются путем фрезерования канавок различной геометрии с характерными размерами порядка 1–3 отрывных диаметров пузырей, т.е. микрооребрением поверхности. Экспериментальные исследования эффективности такого метода выполнены на поверхностях с прямоугольными и треугольными ребрами.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рабочий участок (рис. 1) состоял из латунного цилиндра I, в нижней части которого располагался нагреватель из нихромовой проволоки III. В цилиндр были заделаны шесть хромель-копелевых термопар T1–T6. Сверху к цилиндру I сплавом Вуда припаявался исследуемый образец IV. Цилиндр I помещался в стакан из стеклотекстолита II. Пространство между стаканом и латунным цилиндром заполнялось силиконовым герметиком V.

Рабочий участок помещался в сосуд Дьюара с жидким азотом при атмосферном давлении. Запись

показаний термопар осуществлялась компьютером в автоматическом режиме.

Исследования проводились на поверхностях с двумя типами неоднородностей: треугольными и прямоугольными. При наличии электрического поля максимум напряженности поля создавался в районе вершин ребер, а минимум – в районе основания ребер (см. рис. 2).

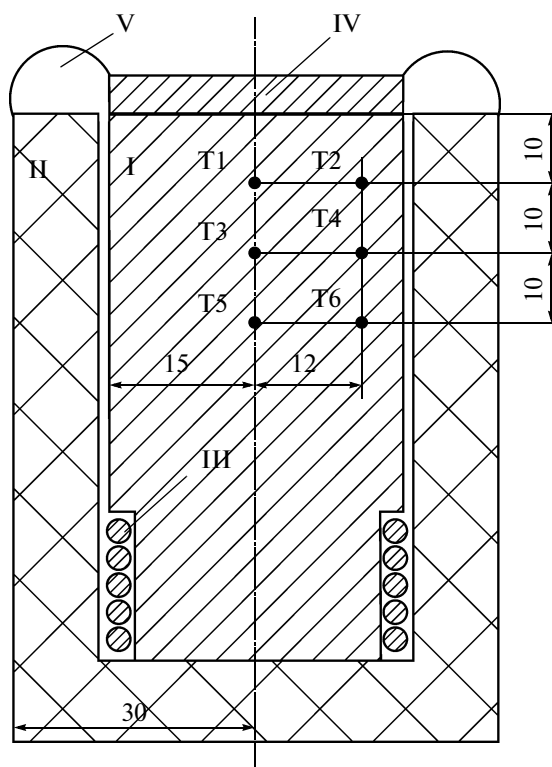


Рис. 1. Рабочий участок для исследования средней теплоотдачи.

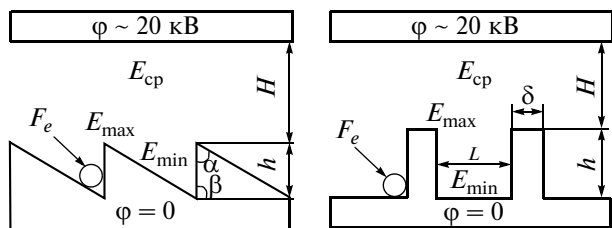


Рис. 2. Схематическое изображение конфигурации экспериментальных образцов.

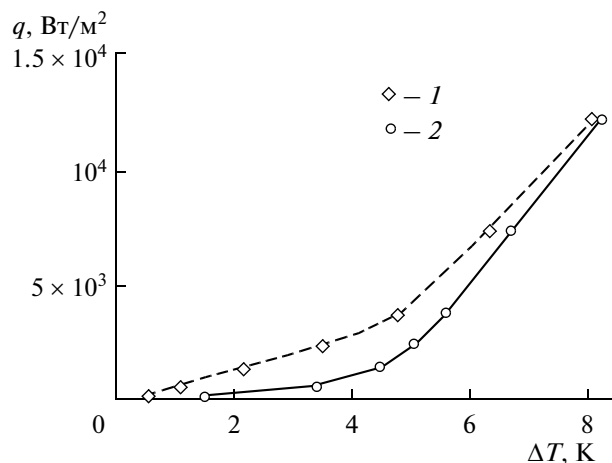


Рис. 3. Кривые кипения на образце с треугольными ребрами при $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $h = 3$ мм, $H = 5$ мм, $U = 17.5$ кВ, $E_{\text{max}} \sim 5.7 \times 10^6$ В/м, $E_{\text{min}} \sim 10^5$ В/м, $E_{\text{cp}} \sim 3.6 \times 10^6$ В/м. Обратный ход: 1 – в электрическом поле, 2 – в отсутствие электрического поля.

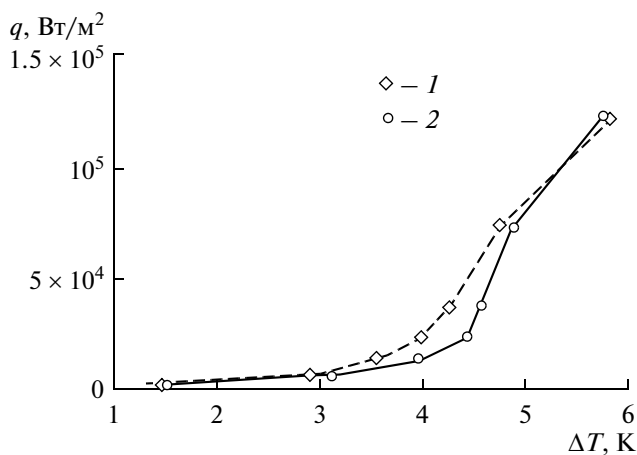


Рис. 4. Кривые кипения на образце с треугольными ребрами при $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $h = 2$ мм, $H = 6$ мм, $U = 20$ кВ, $E_{\text{max}} \sim 5.6 \times 10^6$ В/м, $E_{\text{min}} \sim 10^5$ В/м, $E_{\text{cp}} \sim 3 \times 10^6$ В/м. Обратный ход: 1 – в электрическом поле, 2 – в отсутствие электрического поля.

Такое неоднородное распределение электрического поля создает в диэлектрических жидкостях пondeромоторные силы F_e , которые, во-первых, прижимают пузыри пара, находящиеся между ребрами, к осно-

ванию ребер, а во-вторых, вытесняют пузырьки пара из областей близ вершин ребер [2–4]. Кроме того, само наличие поля облегчает зародышеобразование [5–7], что приводит к уменьшению перегревов стенки, соответствующих началу или прекращению кипения. В итоге можно ожидать увеличения осредненных по поверхности коэффициентов теплоотдачи при кипении диэлектрических жидкостей на начальных участках кривых кипения. Отметим, что в опытах по кипению в поле и без поля исключения влияния гистерезисных эффектов измерения проводились при обратном ходе, т.е. в режимах снижения тепловой нагрузки после достижения развитого кипения. Поскольку при атмосферном давлении характерный отрывной размер пузырьков пара составляет ~ 0.7 мм, характерные размеры неоднородностей на поверхности в наших опытах составляли около 2–3 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты экспериментов на образцах с различными типами треугольных ребер представлены на рис. 3–5.

На рис. 6 представлены термограммы для двух значений теплового потока при изменении потенциала на верхнем электроде от 0 до 20 кВ.

Как видно из рис. 3–5, наличие неоднородного поля вблизи обогреваемой поверхности может приводить к заметной интенсификации теплообмена на начальных участках кривых кипения. При этом осредненный коэффициент теплоотдачи при включении поля, как видно из рис. 6, возрастает на начальном участке в 1.75 раза, а в области развитого кипения на 20%. На рис. 6 видно, что характерное время гидродинамической и тепловой релаксации подложки составляет около 200 с, что существенно больше времени изменения потенциала на верхнем электроде, которое около 50 с.

Роль электроконвекции в увеличении коэффициентов теплоотдачи при кипении во внешних полях может быть оценена на основе сравнительных экспериментов на неоднородных поверхностях различной геометрии при близких условиях образования полевых ловушек, но при различных граничных условиях для конвективных потоков вблизи обогреваемой поверхности. Такие эксперименты выполнены для поверхностей с прямоугольными ребрами.

Результаты экспериментальных исследований кипения на образцах с различными типами прямоугольных ребер представлены на рис. 7, 8.

Сравнительный анализ данных рис. 3–5 и рис. 7, 8 показывает, что на начальных участках кривых кипения при наличии внешнего поля влияние электроконвекции мало и основным механизмом, обеспечивающим интенсификацию теплообмена, является эффект полевых ловушек. Данный эффект приводит к образованию упорядоченной системы мощных стоков тепла, распределенных по поверх-

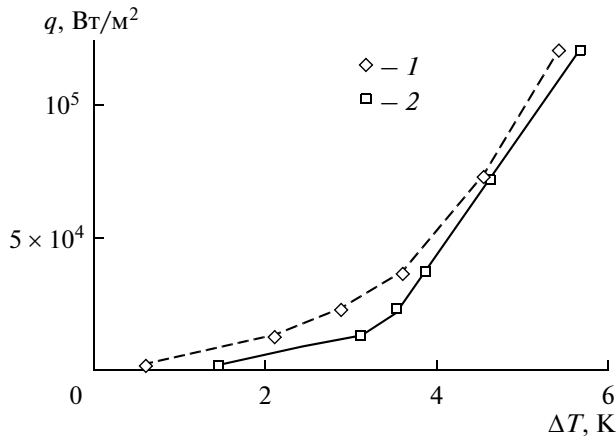


Рис. 5. Кривые кипения на образце с треугольными ребрами при $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 105^\circ$, $h = 2$ мм, $H = 6$ мм, $U = 20$ кВ, $E_{\max} \sim 5.7 \times 10^6$ В/м, $E_{\min} \sim 10^5$ В/м, $E_{\text{ср}} \sim 3.7 \times 10^6$ В/м. Обратный ход: 1 – в электрическом поле, 2 – в отсутствие электрического поля.

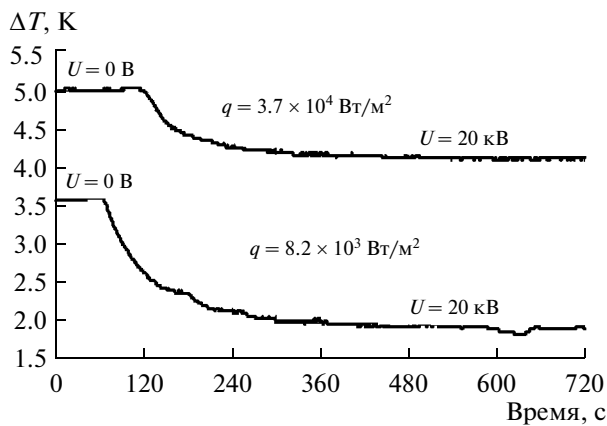


Рис. 6. Термограммы для различных значений теплового потока на образце с треугольными ребрами при $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $h = 2$ мм, $H = 6$ мм.

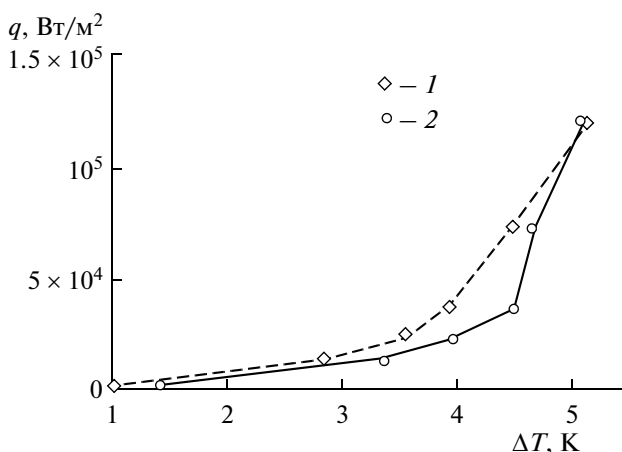


Рис. 7. Кривые кипения на образце с прямоугольными ребрами при $\delta = 1$ мм, $h = 2$ мм, $L = 4$ мм, $H = 4$ мм, $U = 23$ кВ, $E_{\max} \sim 6.5 \times 10^6$ В/м, $E_{\min} \sim 10^5$ В/м, $E_{\text{ср}} \sim 3.5 \times 10^6$ В/м. Обратный ход: 1 – в электрическом поле, 2 – в отсутствие электрического поля.

ности в соответствии с геометрией искусственных неоднородностей. Естественно, это может приводить к изменениям гидродинамики двухфазных течений вблизи обогреваемой поверхности.

Визуальные наблюдения за процессом кипения показали, что электрическое поле кардинальным образом меняет гидродинамику процесса кипения. При нулевой напряженности электрического поля пузырь пара распределены равномерно по всей поверхности образца и имеют малый размер. При воздействии электрического поля отрывающиеся от поверхности пузырь пара в области вершин ребер отсутствуют, парообразование сосредоточено в межреберном пространстве, откуда пар вырывается в виде энергичных паровых струй, состоящих из пузырькой пара большего размера, чем при нулевой напряженности поля (см. рис. 9).

Схематичное изображение кипения на образцах без поля и в поле показано на рис. 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что электрическое поле существенным образом меняет гидродинамику процесса, замещая равномерное парообразование по поверхности образца струями пара из областей полевых ловушек.

Влияние полевых ловушек на теплообмен заключается в снижении перегрева поверхности и некотором уменьшении гистерезиса закипания. На исследуемых образцах, когда размеры полевых ловушек порядка 1–3 отрывных диаметров пузырей, эффект, оказываемый полевой ловушкой, слабо зависит от формы ребер, образующих полевую ловушку.

Теплообмен при кипении на оребренных трубах исследовался в работе [8]. Но в случае оребренных труб электрическое поле вызывает два противоположных эффекта: эффект полевых ловушек, когда электрическое поле препятствует отрыву пузырей пара, и эффект, обусловленный неоднородностью поля по радиусу, который в случае гладких труб способствует более быстрому отрыву пузырей пара и уменьшению их отрывных размеров. В данном случае эффект полевых ловушек исследуется явным образом.

Как известно [5–7], электрическое поле способствует зародышеобразованию, и образующиеся в области максимального поля зародышевые пузырьки пара могут приводить к электрическому пробоя жидкости при меньших напряженностях [9], чем предсказывают теории для пробоя в однородной жидкости. Но, как показывают проведенные эксперименты, при наличии кипения в электрическом поле конфигурация поля приводит к образованию мощных струй, состоящих из крупных пузырей пара, и пробоем по этим паровым областям может происходить при еще меньшем значении напряженности электрического поля.

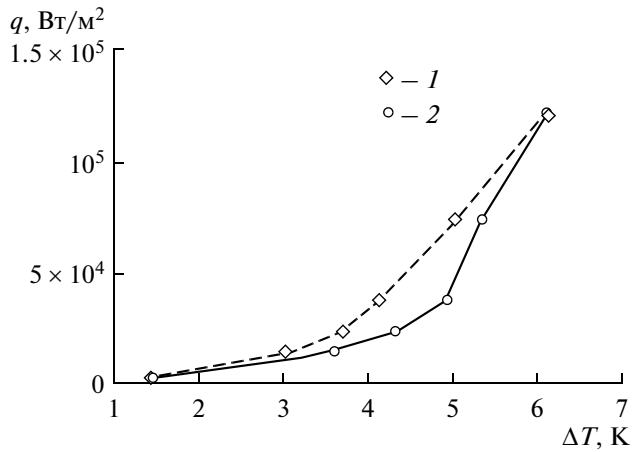


Рис. 8. Кривые кипения на образце с прямоугольными ребрами при $\delta = 1$ мм, $h = 1$ мм, $L = 4$ мм, $H = 4$ мм, $U = 23$ кВ, $E_{\text{max}} \sim 5.4 \times 10^6$ В/м, $E_{\text{min}} \sim 2 \times 10^5$ В/м, $E_{\text{cp}} \sim 3.5 \times 10^5$ В/м. Обратный ход: 1 – в электрическом поле, 2 – в отсутствие электрического поля.

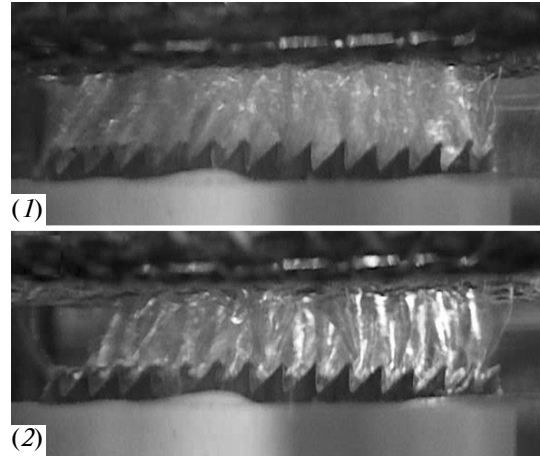


Рис. 9. Фотография кипения: 1 – в отсутствие электрического поля, 2 – в электрическом поле $U = 20$ кВ.

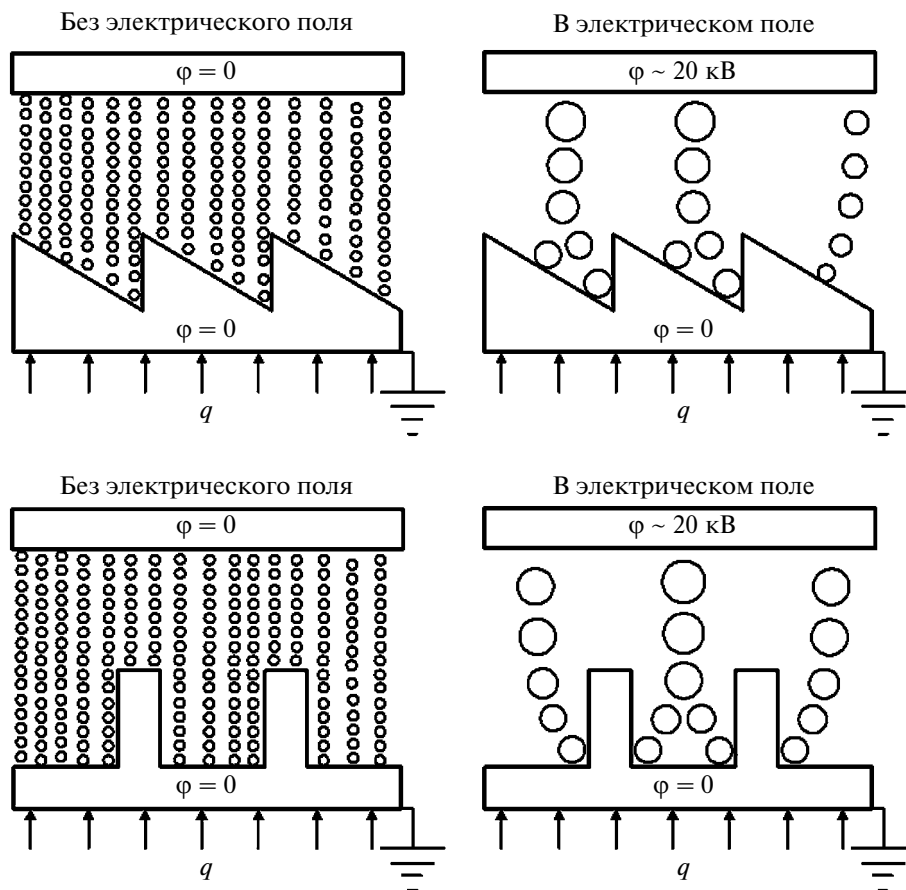


Рис. 10. Схематичное изображение кипения на треугольных и прямоугольных образцах без поля и в электрическом поле.

Авторы выражают благодарность А.И. Леонтьеву и В.С. Воробьеву за полезные обсуждения результатов экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-08-00708-а) и научной школы НШ-2886.2008.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еронин А.А., Малышенко С.П., Журавлев А.И. Размерные эффекты в локальном теплообмене при кипении жидкого азота в электрическом поле // ТВТ. 2010. Т. 48. № 5. С. 798.
2. Leontiev A.I., Lloyd J.R., Malysenko S.P., Borzenko V.I., Dunikov D.O., Eronin A.A., Nazarova O.V. New Effects in Interfacial Heat and Mass Transfer of Boiling and Evaporation in Micro-Scale Porous Materials // Proc. of 2003 ASME Int. Mech. Eng. Congress. Washington, DC, USA. Nov. 15–21. 2003. CD publ.
3. Борзенко В.И., Еронин А.А., Леонтьев А.И., Малышенко С.П. Эффект полевых ловушек в теплообмене при кипении диэлектрических жидкостей во внешних электрических полях // ТВТ. 2004. Т. 42. № 3. С. 456.
4. Воробьев В.С., Малышенко С.П., Петрин А.Б. Об эффекте полевых ловушек при кипении диэлектрических жидкостей в неоднородных электрических полях // ТВТ. 2005. Т. 43. № 2. С. 249.
5. Воробьев В.С., Малышенко С.П. Образование зародышей новой фазы в электрических полях // ЖЭТФ. 2001. Т. 120. Вып. 4(10). С. 863.
6. Vorob'ev V.S., Malysenko S.P. Why Does an External Electrical Field Stimulate Formation of New Phase Nuclei in Dielectrics? // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. № 3. P. 371.
7. Vorob'ev V.S., Malysenko S.P., Petrin A.B. The Role of an Electrode in the Formation of New Phase Nuclei in Dielectrics // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. № 3. P. 257.
8. Cooper P. EHD Enhancement of Nucleate Boiling // Trans. ASME. 1990. V. 112. P. 458.
9. Timoshkin I., Macgregor S., Given M., Atrazhev V., Vorob'ev V. Critical Parameters of Gas Cavities in Dielectric Liquids Stressed with High Electric Fields // Proc. 2nd Euro-Asian Pulsed Power Conf. Vilnius, Lithuania. Sept. 22–26. 2008. CD publ.