

Теплообмен и развитие процесса кипения в электрическом поле на модифицированных поверхностях

И. М. Черника*, М. К. Болога

Институт прикладной физики, Молдавский государственный университет,
г. Кишинев, MD-2028, Молдова
*e-mail: ion_cernica@yahoo.com

Поступила в редакцию 08.08.2025
После доработки 21.08.2025
Принята к публикации 25.08.2025

Представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении диэлектрической жидкости в электрическом поле на модифицированных поверхностях, полученных методом электроискрового легирования. Изучено влияние напряженности электрического поля, формы электродов, межэлектродного расстояния, материала теплоотдающей поверхности, параметров шероховатости и других факторов на характеристики теплообмена и развитие процесса кипения. Представлен сравнительный анализ влияния поля и структурной модификации теплоотдающей поверхности на интенсивность теплообмена. Достигнута интенсификация теплообмена до 3,5 раза по сравнению с кипением на гладкой поверхности в отсутствие поля. На основе визуальных наблюдений и скоростной киносъемки обсуждается механизм кипения в электрическом поле на модифицированных поверхностях.

Ключевые слова: теплообмен, кипение, тепловой поток, температурный напор, коэффициент теплоотдачи, шероховатость, интенсификация, электрическое поле

УДК 536.248.2

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.5.18>

ВВЕДЕНИЕ

Использование электрического поля для целей интенсификации конвективного теплообмена в жидкостях и газах можно отнести к 1916 г., когда в Великобритании был выдан первый патент [1], в котором указывалось, что под влиянием электрического поля (потенциалом в 5–50 кВ) увеличивается (в 3 раза) скорость испарения воды. Впоследствии электрический метод интенсификации теплообмена в однофазных и двухфазных средах привлек внимание исследователей, и уже в первых работах, посвященных теплообмену при кипении на технически гладких поверхностях под воздействием электрического поля, было установлено значительное улучшение теплоотдачи. Однако, несмотря на достигнутые успехи и обнадеживающие исследования, этот многообещающий метод так и не нашел должного практического применения.

Интерес к интенсификации теплообмена при кипении под воздействием электрического поля возрос, главным образом, в связи с разработкой технических устройств, способных доставлять жидкие диэлектрики в качестве теплоносителя к теплообменным поверхностям с целью обеспечения заданных тепловых режимов. В этом аспекте проведены исследования по изучению влияния тепло- и электрофизических свойств

кипящей среды на линии насыщения, напряженности поля и степени его однородности, формы и размеров электродов, межэлектродного расстояния и других параметров на характеристики кипения. Однако электрический метод не всегда обеспечивает предусмотренные температурные режимы, особенно остро стоит вопрос при высоких тепловых нагрузках и значительных температурных напорах, когда влияние поля незначительно [2–4].

Активные исследования по интенсификации теплообмена при кипении начались и на модифицированных поверхностях, полученных механической обработкой и нанесением металлических покрытий [5–10]. Было показано, что при этом интенсификация теплообмена связана с появлением на теплоотдающей поверхности новых центров парообразования, увеличением скорости роста и частоты отрыва паровых пузырей. Кроме того, улучшение микрохарактеристик поверхности приводит к более раннему началу кипения, что особенно важно для жидкостей, хорошо смачивающих поверхности. Однако применение лишь модифицированных поверхностей не обеспечивает достижения высокой степени интенсификации [5–10].

Более высокую интенсификацию теплообмена можно получить при кипении жидкостей на модифицированных поверхностях в электрическом поле. Обстоятельные исследования

[11, 12] по теплообмену при кипении хладонов и криогенных жидкостей в электрическом поле на модифицированных поверхностях, полученных механической обработкой, подтвердили физические предпосылки интенсификации теплообмена этим комплексным методом. При использовании активных и пассивных методов коэффициенты теплоотдачи увеличиваются вследствие действия каждого составляющего способа интенсификации. В то же время из-за отсутствия ясных представлений о механизме совместного воздействия поля и структурной модификации поверхности, недостаточности экспериментальных данных, а также надежных методов расчета теплообмена многие результаты не вышли за пределы лабораторных исследований.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию воздействия неоднородного электрического поля на процесс кипения диэлектрической жидкости в большом объеме с применением модифицированных поверхностей, полученных электроискровым способом. Основное внимание уделено влиянию напряженности поля, формы и размеров электродов, межэлектродного расстояния, материала и параметров шероховатости поверхности на основные характеристики кипения, а также обобщению экспериментальных результатов. Интенсификация теплообмена при кипении на модифицированных поверхностях в электрическом поле значима для практического применения и позволяет существенно уменьшить габаритные размеры систем охлаждения, терmostатирования и теплообменного оборудования.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка для изучения теплообмена при кипении в электрическом поле с применением модифицированных поверхностей состояла из замкнутой герметичной камеры, рабочего участка и измерительной аппаратуры. Камера выполнена в виде металлического цилиндрического корпуса внутренним диаметром 300 мм и высотой 200 мм. Экспериментальный участок состоял из высоковольтного электрода и теплоотдающего элемента с нулевым электрическим потенциалом, который погружался в сравнительно большой объем жидкости (гексан с температурой кипения 68,7 °С при атмосферном давлении, относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon/\epsilon_0 = 1,88$ и удельной электрической проводимостью $\sigma_e = 10 \text{ пС/м}$).

Кипение осуществлялось на одиночных нержавеющих трубках диаметром 4 мм и длиной

80 мм, покрытых тонким слоем карбида вольфрама или нержавеющей стали электроискровым способом. Для нанесения покрытия применялась установка для электроискрового легирования ЭФИ-46А (выпущенная Опытным заводом Института прикладной физики, Молдова), использовались электроды из карбида вольфрама и нержавеющей стали. Покрытия имели развитую шероховатость: $R_a = 3,216 \text{ мкм}$ (поверхность № 1), $R_a = 3,493 \text{ мкм}$ (поверхность № 2), $R_a = 4,316 \text{ мкм}$ (поверхность № 3), $R_a = 5,288 \text{ мкм}$ (поверхность № 4), $R_a = 4,285 \text{ мкм}$ (поверхность № 5). Поверхности № 1–4 покрыты металлическим слоем карбида вольфрама, поверхность № 5 – слоем нержавеющей стали. Толщина слоя составляла 0,05–0,075 мм. Для измерения шероховатости по параметру R_a применялся профилометр Surftest SJ-310 (Mitutoyo, Япония).

В опытах использовались два вида высоковольтных электродов (рис. 1), представляющих собой прямоугольные или круглые латунные решетки, расположенные параллельно теплоотдающему элементу сверху. Межэлектродное расстояние δ – наименьшее расстояние между высоковольтным электродом и теплоотдающей поверхностью – варьировалось в пределах 1,5–8 мм. Использовалась электрическая схема с отрицательным высоковольтным потенциалом, который изменялся ступенчато до 25 кВ.

Эксперименты проводились при температуре насыщения исследуемой жидкости, выставлялось определенное значение теплового потока, и трубка нагревалась до появления поверхностного или развитого пузырькового кипения. Регистрировались показания поверхностных и погружных термопар, измерялись сила тока и напряжение, подаваемое на экспериментальный участок. Затем на верхний электрод подавался электрический потенциал и снималась зависимость потенциала внешнего электростатического поля Φ от перегрева поверхности $\Delta T = T_w - T_s$. Каждая точка кривой $\Phi = f(\Delta T)$ измерялась с учетом времени выжидания, необходимого для установления температуры после изменения потенциала. Опыты проводились при напряжениях до возникновения пробоев рабочей жидкости (ориентировочно 25–30 кВ). После этого выставлялся новый тепловой поток, и эксперименты при кипении с полем и без поля повторялись по описанной методике при атмосферном давлении в диапазоне режимных параметров $q = 5 \times 10^2 - 1,5 \times 10^5 \text{ Вт/м}^2$ и $\Delta T = 0,2 - 30 \text{ К}$.

Погрешности основных измеряемых величин – температурный напор, плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи –

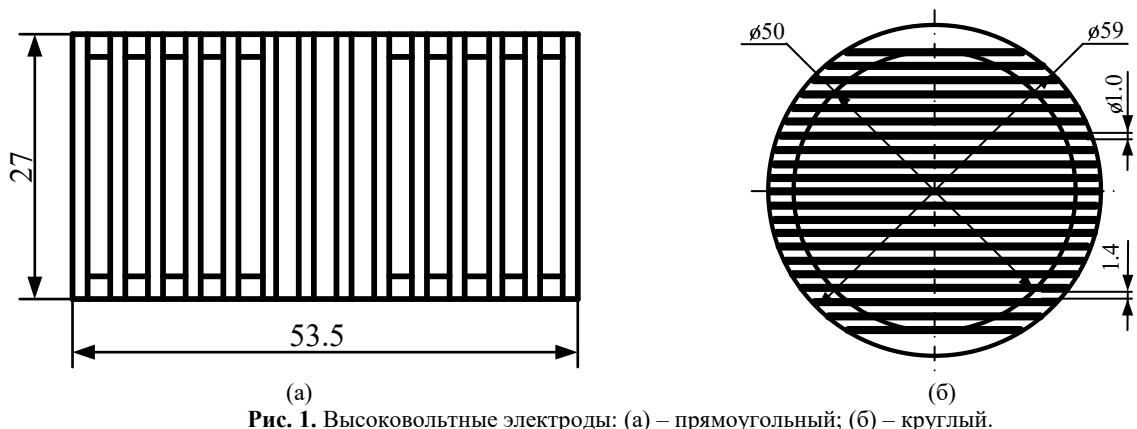


Рис. 1. Высоковольтные электроды: (а) – прямоугольный; (б) – круглый.

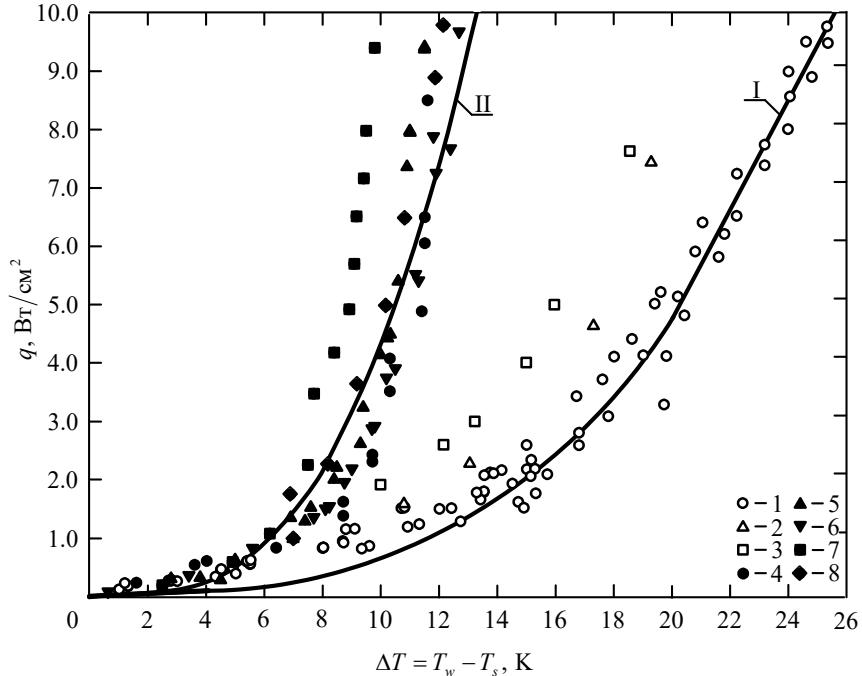


Рис. 2. Теплообмен при кипении гексана на технически гладких и модифицированных поверхностях с различной шероховатостью в отсутствие поля: I – $R_a = 0,685$ мкм; II – $R_a = 0,52$ [13]; III – $R_a = 1,17$ [13] – гладкая поверхность; 4 – $R_a = 3,216$ мкм; 5 – $R_a = 3,493$ мкм; 6 – $R_a = 4,316$ мкм; 7 – $R_a = 5,288$ мкм – поверхности №1–4 соответственно; 8 – $R_a = 4,285$ мкм – поверхность № 5; кривые – расчет по формуле (1): I – $C_0 = 7 \times 10^{-5}$; II – $C_0^* = 5 \times 10^{-4}$.

не превышают 2; 8 и 15% соответственно. Экспериментальная установка и методика проведения опытов детально описаны в работе [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ ОБСУЖДЕНИЕ И ОБОБЩЕНИЕ

Теплообмен при кипении в отсутствие электрического поля исследовался с использованием технически гладкой трубы со средним арифметическим отклонением профиля $R_a = 0,685$ мкм. Результаты представлены на рис. 2, на котором приводится также сопоставление с литературными данными [13]. Достигнуто удовлетворительное согласование с известными данными по кипению гексана на технически гладких поверхностях, что подтверждает корректность методики измерений.

При кипении гексана на модифицированных поверхностях в отсутствие поля (рис. 2)

выявлены существенный сдвиг кривых в область пониженных температурных напоров и значительное увеличение коэффициента теплоотдачи. Наибольший отвод теплоты с поверхности нагрева наблюдается при $R_a = 5,288$ мкм. При кипении гексана влияние теплофизических свойств поверхностей нагрева, покрытых металлическим слоем карбида вольфрама и нержавеющей стали, не проявляется. Для модифицированных поверхностей во всем исследованном диапазоне изменения плотности теплового потока сохраняется характерная для области развитого пузырькового кипения зависимость q от ΔT , то есть $q = C\Delta T^3$, что эквивалентно общепринятой зависимости $\alpha = Kq^{2/3}$ [5, 6].

Опытные данные обобщаются единой зависимостью [2, 3]:

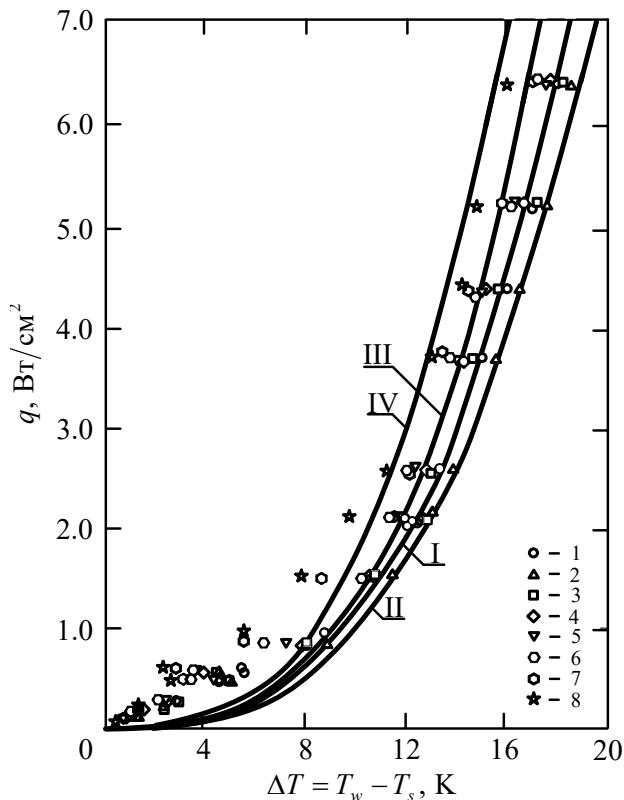


Рис. 3. Сопоставление формул (1) и (2) с опытными данными по кипению гексана на технически гладкой поверхности в электрическом поле: 1, I – $E = 0$; 2, II – 16,67 кВ/см; 3 – 25,00; 4 – 33,33; 5, III – 41,67; 6 – 50,00; 7 – 58,33; 8, IV – 66,67 кВ/см.

Таблица. Значения коэффициента C_e

$E \times 10^{-6}$, В/м	C_e , расчет по формуле (3)	C_e , фактическое значение	$E \times 10^{-6}$, В/м	C_e , расчет по формуле (3)	C_e , фактическое значение
1,66(6)	94,083	81	5,000	10,458	13
2,500	41,832	35	5,83(3)	7,684	11
3,33(3)	23,535	20	6,66(6)	5,882	9
4,16(6)	15,057	16			

$$q = C_0 \frac{c_p'^3 (\rho' - \rho'')}{r^{3/2}} \times (T_w - T_s)^3, \quad (1)$$

где C_0 – эмпирический коэффициент, зависящий от состояния теплоотдающей поверхности и равный 7×10^{-5} , для технически гладкой поверхности, и $C_0^* = 5 \times 10^{-4}$ – для модифицированных поверхностей. Константа C_0^* больше константы C_0 в 8,14 раза, что связано с улучшением теплоотдачи за счет структурной модификации поверхности нагрева и, вероятно, с точностью самих экспериментальных данных. Разброс опытных данных применительно к результатам расчета не превышает $\pm 15\%$.

Несмотря на удовлетворительное согласование с экспериментальными данными, формулу (1) нельзя считать универсальной, поскольку она получена из соображений размерности, а, как известно, подобные расчетные зависимости страдают тем недостатком, что не учитывают физические представления о механизме развития пузырькового кипения на поверхности нагрева, а

численные константы C_0 и C_0^* определены на основе экспериментальных данных.

На основании этих исследований следует отметить, что открытый супругами Б.Р. и Н.И. Лазаренко электроискровой способ упрочнения металлических поверхностей является перспективным и в части интенсификации теплообмена. Улучшение теплоотдачи происходит за счет появления новых центров парообразования, уменьшения отрывных диаметров паровых пузырей и увеличения частоты их отрыва.

Теплообмен при кипении в электрическом поле. Основным экспериментам предшествовали опыты, в которых кипение осуществлялось на технически гладкой поверхности под воздействием электрического поля. Результаты показаны на рис. 3 в виде зависимости удельной тепловой нагрузки от температурного перегрева при различных напряженностях поля E . Оказалось, что чем больше $\Delta T = T_w - T_s$, тем интенсивнее образование пузырьков пара и кипение

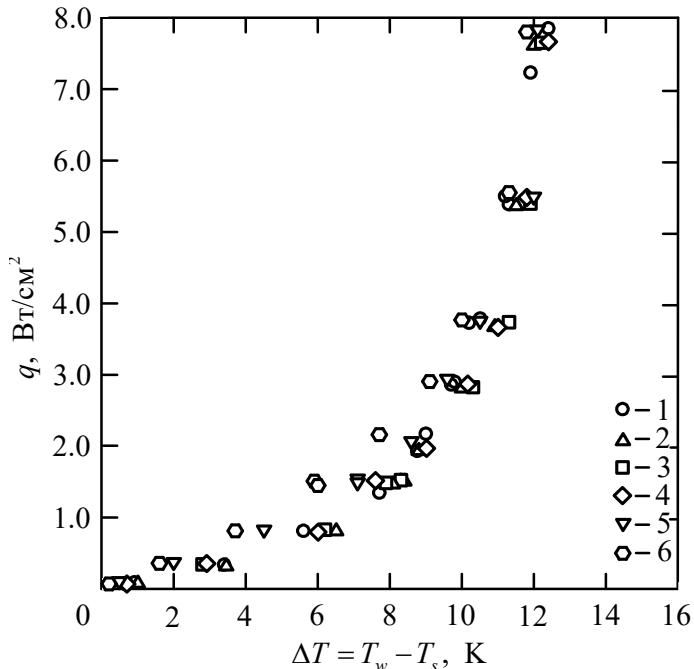


Рис. 4. Влияние напряженности поля на интенсивность теплообмена при кипении гексана на модифицированной поверхности № 3 ($R_a = 4,316$ мкм), $\delta = 3$ мм: 1 – $E = 0$ кВ/см; 2 – 16,67; 3 – 33,33; 4 – 50,00; 5 – 66,67; 6 – 83,33 кВ/см.

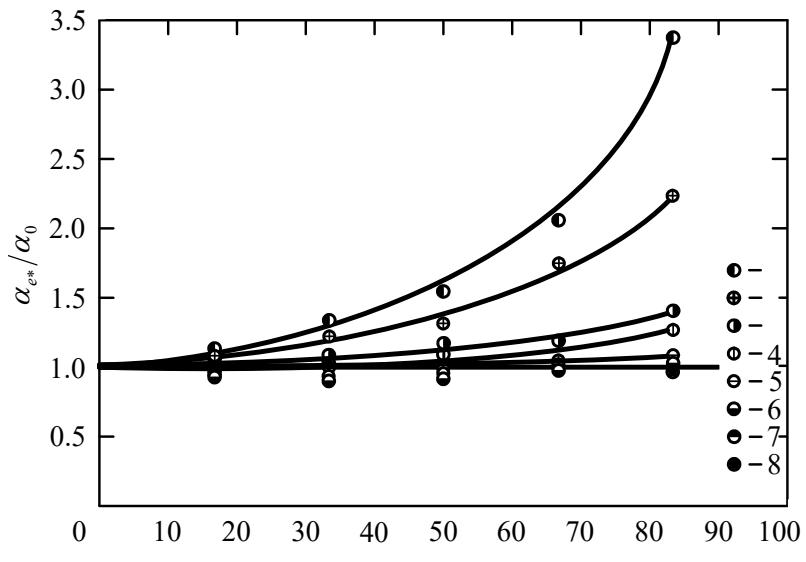


Рис. 5. Влияние напряженности поля и плотности теплового потока на интенсивность теплообмена при кипении на модифицированной поверхности № 3 ($R_a = 4,316$ мкм), $\delta = 3$ мм: 1 – $q = 875$ Вт/м²; 2 – 3420; 3 – 14690; 4 – 20145; 5 – 28640; 6 – 37150; 7 – 54545; 8 – 76490 Вт/м².

жидкости, выше значения коэффициента теплоотдачи. На начальном этапе повышения напряженности поля наблюдается незначительное уменьшение плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи, при напряженностях $E \geq 25$ кВ/см интенсификация теплообмена достигает двукратного роста по сравнению с кипением без поля. Однако при тепловых потоках $q \geq 4-5$ Вт/см² влияние поля постепенно ослабевает, а при $q \approx 10$ Вт/см² практически исчезает. Таким образом, воздействие поля на теплообмен при кипении на технически гладкой поверхности эффективно в области умеренных

тепловых потоков, когда образование пузырьков пара менее интенсивно и подавляется полем.

Кривые кипения на технически гладкой поверхности в электрическом поле обобщаются зависимостью [2, 3]:

$$q = C_e \left(\frac{\lambda'}{\sigma} \right) \frac{\varepsilon E^2}{c_p' r^{1/2}} (T_w - T_s)^3, \quad (2)$$

где C_e – численная постоянная, зависящая от наличия электрического поля.

В первом приближении значения коэффициента C_e можно определить по формуле

$$C_e = C_0 \left(\frac{c'_p \sigma}{\lambda'} \right)^4 \frac{\rho' - \rho''}{r} \frac{1}{\varepsilon E^2}, \quad (3)$$

полученной из условия равенства плотностей теплового потока при кипении с полем и без него. С физической точки зрения такое допущение вполне возможно при больших тепловых потоках, когда влияние поля на основную характеристику кипения незначительно.

Анализ формулы (3) показывает, что константа C_e зависит от электрофизических свойств диэлектрической жидкости, состояния поверхность–жидкость и напряженности поля. Значения C_e в (2) приведены в таблице.

Сравнение расчетных и экспериментальных плотностей теплового потока, приведенных на рис. 3, показывает, что опытные данные удовлетворительно аппроксимируются формулой (2), если расчётные значения константы C_e округлить. В этом случае результаты различаются на $\pm 20\%$ и расхождение растет в области умеренных тепловых потоков, где принятное допущение не соблюдается.

Основная серия экспериментов проведена на поверхностях, покрытых металлическим слоем карбida вольфрама и нержавеющей стали с применением электрического поля. Оба материала при одной и той же шероховатости и напряженности поля дают практически одинаковые значения коэффициента теплоотдачи. Также не обнаружено влияние формы и размеров высоковольтных электродов.

Влияние поля на теплообмен при кипении на модифицированных поверхностях проявляется в большей степени при малых и умеренных плотностях теплового потока (рис. 4, 5). На рис. 5 данные рис. 4 обработаны в координатах $\alpha_e^*/\alpha_0 - E$, где α_e^* – коэффициент теплоотдачи при кипении в электрическом поле на модифицированных поверхностях, а α_0 – коэффициент теплоотдачи при кипении на технически гладких поверхностях в отсутствие поля. При заданном q с ростом напряженности поля кривые кипения (рис. 4) смещаются в область меньших тепловых напоров, где кипение менее интенсивно, а значения коэффициента теплоотдачи выше. С ростом q влияние напряженности поля уменьшается, а при $q \approx 6 \text{ Вт}/\text{см}^2$ и более практически исчезает (рис. 4 и 5).

Интенсивность кипения диэлектрической жидкости в большом объеме определяется также состоянием теплоотдающей поверхности. На рис. 6 представлены экспериментальные данные при кипении гексана на модифицированных поверхностях с различной шероховатостью в электрическом поле. Влияние шероховатости

проявляется во всем диапазоне плотностей теплового потока и напряженностей поля. При заданных q и E с ростом среднего арифметического отклонения профиля R_a наблюдаются уменьшение температурных напоров $\Delta T = T_w - T_s$ и сравнительно небольшой рост коэффициента теплоотдачи. С увеличением шероховатости теплоотдающей поверхности появляются новые центры парообразования, которые способны генерировать паровую фазу в больших количествах.

Важное практическое значение имеет вопрос определения межэлектродного расстояния, при котором коэффициенты теплоотдачи максимальны. Для однозначного ответа на поставленный вопрос авторами построен график зависимости найденных значений α_e^* от наименьшего расстояния между электродами b и электрического потенциала Φ (рис. 7). Из рис. 7 видно, что оптимальное межэлектродное расстояние равно 3 мм и оно не зависит от потенциала Φ . В количественном отношении полученный результат согласуется с опытными данными работ [2–4, 14], в которых такой же результат наблюдался при кипении на поверхностях с пористым покрытием и в электрогидродинамическом потоке.

Влияние межэлектродного расстояния на интенсивность теплообмена основывается на особенности взаимодействия пульсационного движения жидкости вследствие парообразования и возмущений потока жидкости, обусловленных электрической конвекцией. При расстоянии меньше оптимального электроконвекция проявляется преимущественно в пределах пристеночного перегретого слоя, где температура жидкости близка к температуре твердой поверхности. В этом случае эвакуация паровых пузырей от теплоотдающей поверхности происходит в основном за счет разности диэлектрической проницаемости жидкой и паровой фаз и интенсивность теплообмена оказывается ниже, чем при оптимальном межэлектродном расстоянии. По мере роста межэлектродного промежутка при определенном потенциале поля наступает гидродинамическая перестройка структуры кипящей жидкости, в результате чего поступление достаточных порций холодной жидкости к поверхности нагрева затруднено. В определенных местах вблизи верхней образующей трубы возможно формирование сухих пятен, и отвод тепла непосредственно к пару происходит менее интенсивно, что определяет ухудшение теплоотдачи при межэлектродном расстоянии больше оптимального.

Для интенсификации теплообмена при кипении диэлектрической жидкости в электри-

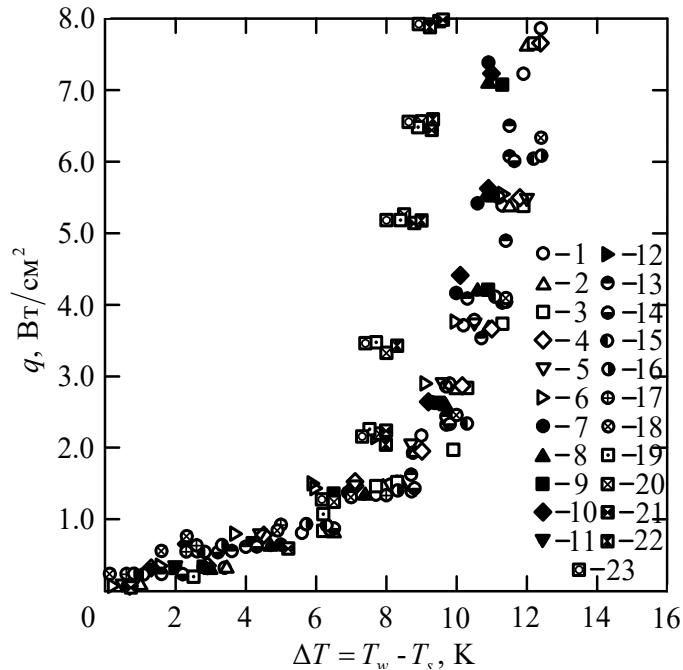


Рис. 6. Кривые теплообмена при кипении гексана на модифицированных поверхностях различной шероховатости в электрическом поле, $\delta = 3$ мм: 1 – $E = 0$; 2 – 16,67 мкм; 3 – 33,33; 4 – 50,00; 5 – 66,67; 6 – 83,33 кВ/см – $R_a = 4,316$ мкм; 7 – $E = 0$; 8 – 16,67; 9 – 33,33; 10 – 50,00; 11 – 66,67; 12 – 83,33 кВ/см – $R_a = 3,493$ мкм; 13 – $E = 0$; 14 – 16,67; 15 – 33,33; 16 – 50,00; 17 – 66,67; 18 – 83,33 кВ/см – $R_a = 3,216$ мкм; 19 – $E = 0$; 20 – 16,67; 21 – 33,33; 22 – 50,00; 23 – 66,67 кВ/см – $R_a = 5,288$ мкм.

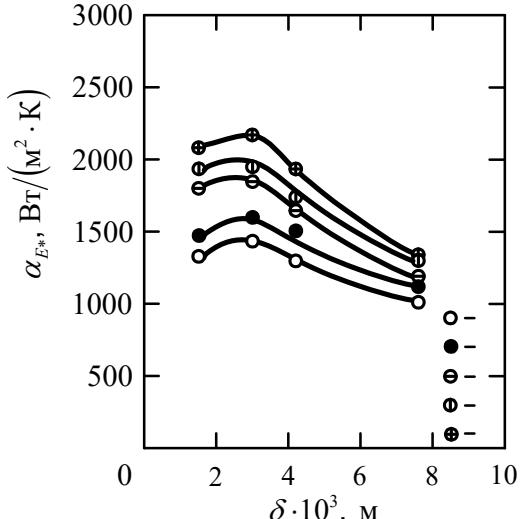


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи от межэлектродного расстояния для модифицированной поверхности № 3 ($R_a = 4,316$ мкм) при $q = 7500$ Вт/м²: 1 – $\Phi = 0$; 2 – 10 кВ; 3 – 15; 4 – 20; 5 – 25 кВ.

ческом поле характерен ряд специфических обстоятельств. С одной стороны, неоднородное поле обеспечивает дополнительную выталкивающую силу, действующую на пузырек пара, что приводит к облегчению его всплытия, увеличению частоты образования и отрыва пузырьков пара. Этот эффект поля заметнее при высоких напряженностях. Кроме того, электрическое поле существенно деформирует паровой пузырек, что обусловливает значительное изменение межфазной поверхности пар–жидкость, а следовательно, и физического состояния теплоотдающей поверхности. С другой стороны, поле существенно воздействует на межфазное натяжение на границе с

твердой поверхностью, что также влияет на интенсивность отвода тепла к кипящей жидкости.

Визуальные наблюдения за парообразованием на структурно модифицированных поверхностях и регистрация процесса скоростной киносъемкой показывают, что электрическое поле существенным образом изменяет гидродинамику кипения (рис. 8). Так, в области слаборазвитого кипения в отсутствие поля пузырьки образуются практически равномерно на всей поверхности кипения и таким же образом отрываются от нее. Но когда поверхность кипения находится под действием внешнего электрического поля, испарение на верхней образующей исчезает, в то

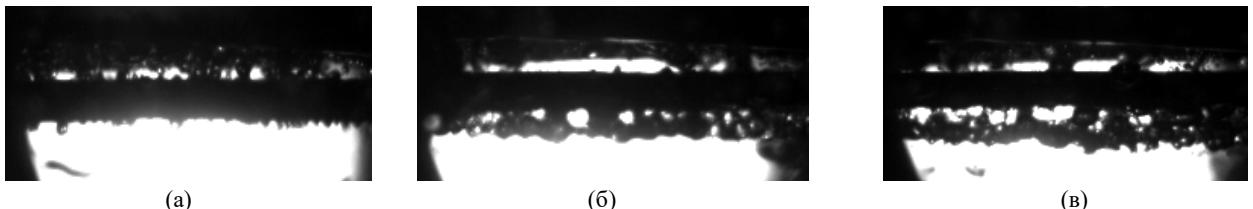


Рис. 8. Развитие процесса кипения на модифицированной поверхности, $R_a = 4.285$ мкм: (а) – в отсутствие поля: $q = 17620$ Bt/m^2 , $\Delta T = 6.90$ К, $\alpha = 2554$ $\text{Bt}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $E = 0$; (б) – в электрическом поле: $q = 17643$ Bt/m^2 , $\Delta T = 8.70$ К, $\alpha_{e*} = 2028$ $\text{Bt}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $E = 6.667$ MB/m ; (в) – в электрическом поле: $q = 23563$ Bt/m^2 , $\Delta T = 7.90$ К, $\alpha_{e*} = 2983$ $\text{Bt}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $E = 9.833$ MB/m .

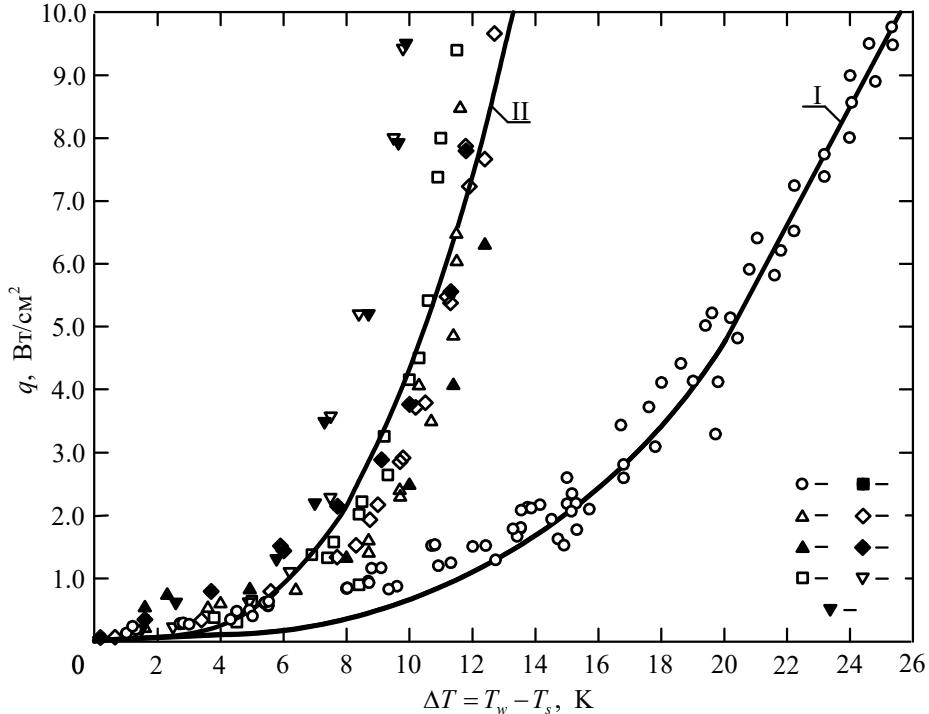


Рис. 9. Зависимость q от ΔT при кипении гексана на модифицированных поверхностях различной шероховатости в электрическом поле, $\delta = 3$ мм: 1 – гладкая поверхность; 2, 3 – $R_a = 3,216$ мкм; 4, 5 – $R_a = 3,493$ мкм; 6, 7 – $R_a = 4,316$ мкм; 8, 9 – $R_a = 5,288$ мкм; светлые точки – $E = 0$; черные – $E = 66,67$ kB/cm ; кривые I, II – расчет по формуле (2).

время как на остальной поверхности концентрируется в углублениях шероховатости, откуда пар продолжает отбрасываться в виде отдельных струй. Диаметр оторвавшихся пузырьков пара от нижней образующей больше, чем пузырьков, оторвавшихся от боковых образующих. С увеличением плотности теплового потока число центров зародышеобразования также увеличивается.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Представляет интерес оценка степени интенсификации теплообмена при кипении на модифицированных поверхностях в электрическом поле. В данной работе степень интенсификации теплообмена оценивается величиной $\frac{\alpha_{e*}}{\alpha_0}$, представляющей собой отношение коэффициента теплоотдачи при кипении на модифицированных поверхностях в электрическом поле к коэффициенту теплоотдачи при кипении на технически гладкой поверхности в отсутствие поля. Для

удобства анализа этой величины приведем ее к виду:

$$\frac{\alpha_{e*}}{\alpha_0} = \frac{\alpha_*}{\alpha_0} \times \frac{\alpha_{e*}}{\alpha_*}.$$

Проанализируем характер изменения относительных коэффициентов теплоотдачи $\frac{\alpha_*}{\alpha_0}$ и $\frac{\alpha_{e*}}{\alpha_*}$, учитывая влияние структурной модификации поверхности теплообмена в условиях отсутствия поля и воздействия внешнего электрического поля на модифицированных поверхностях.

Интенсивность теплообмена при кипении на модифицированной поверхности в отсутствие поля оценена формулой

$$\frac{\alpha_*}{\alpha_0} = \frac{C_{0*}}{C_0} \frac{(T_w - T_s)_*^2}{(T_w - T_s)^2}, \quad (4)$$

полученной из условия равенства плотностей теплового потока для гладкой и модифицированной поверхностей. Нижний индекс (*) относится к модифицированной поверхности.

Анализ формулы (4) показывает, что интенсивность теплообмена при кипении на модифицированных поверхностях зависит от отношения эмпирических коэффициентов C_{0*} и C_0 и отношения соответствующих температурных напоров во второй степени. Расчет по формуле (2) дает значение $\alpha_{e*}/\alpha_0 = 2-2,5$ во всем диапазоне плотностей тепловых потоков.

Степень влияния электрического поля на интенсивность теплообмена можно оценить зависимостью

$$\frac{\alpha_{e*}}{\alpha_*} = \frac{(T_w - T_s)_{e*}^2}{(T_w - T_s)_*^2} \quad (5)$$

полученной аналогично формуле (4).

Из формулы (5) следует, что влияние поля зависит только от отношения температурных напоров во второй степени. Расчет по формуле (5) дает значение $\alpha_{e*}/\alpha_* = 1,25-1,35$ во всем диапазоне плотностей тепловых потоков и достаточно больших напряженностей электрического поля.

Таким образом, интенсивность теплообмена при кипении на модифицированных поверхностях под воздействием электрического поля оценивается формулой

$$\frac{\alpha_{e*}}{\alpha_0} = \frac{\alpha_*}{\alpha_0} \times \frac{\alpha_{e*}}{\alpha_*} = \frac{C_{0*}}{C_0} \frac{(T_w - T_s)_{e*}^2}{(T_w - T_s)_*^2}. \quad (6)$$

Расчет по формуле (6) дает значение $\alpha_{e*}/\alpha_0 = 2,5-3,5$ во всем диапазоне плотностей тепловых потоков и достаточно больших напряженностей поля. Это значение удовлетворительно согласуется с данными рис. 5 и 9.

На рис. 9 показано совместное влияние поля и модификации теплоотдающей поверхности. Максимальное влияние на интенсивность теплообмена оказывает модификация структуры теплоотдающей поверхности. Однако слабое влияние шероховатости модифицированных поверхностей не позволило связать коэффициент теплоотдачи с характеристиками поверхности нагрева.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность интенсификации теплообмена при кипении в электрическом поле на модифицированных поверхностях, полученных способом электроискрового легирования. Наибольшее влияние на интенсивность теплообмена при кипении гексана оказывает модификация структуры теплоотдающей поверхности. Вместе с тем теплообмен при кипении на модифицированных поверхностях в электрическом поле имеет ряд существенных особенностей – слабое влияние поля при

больших тепловых потоках и наличие оптимального межэлектродного промежутка, при котором интенсивность теплоотдачи максимальна.

Рассматриваемый авторами процесс теплообмена при кипении на модифицированных поверхностях в электрическом поле изучен недостаточно. Полученные экспериментальные результаты не дают возможности разработать физический механизм теплопереноса при кипении под воздействием поля и структурной модификации теплоотдающей поверхности. Необходимы дальнейшие исследования для определения микрохарактеристик процесса кипения и разработки инженерного метода расчета теплообмена.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Республики Молдова в рамках подпрограммы 011203 (2024–2027).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность рецензенту за полезные замечания, учет которых позволил улучшить качество работы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cooper, P., EHD enhancement of nucleate boiling, *J. Heat Transfer Trans. ASME*, 1990, vol. 112, p. 458.
2. Chernica, I.M., Bologa, M.K., Mardarskii, O.I., Kozhevnikov, I.V., Action of electrohydrodynamic flow on heat transfer at boiling, *J. Electrost.*, 2021, vol. 109, art. ID 103524. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103524>
3. Черника, И.М., Болога, М.К., Мардарский, О.И., Кожевников И.В., Особенности теплообмена при пузырьковом кипении в электроконвективном потоке, *ЭОМ*, 2019, т. 55, № 2, с. 44.
4. Черника, И.М., Болога, М.К., Кожевников, И.В., Моторин, О.В., Интенсификация теплообмена при кипении в электрогидродинамическом потоке, *XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену, Минск, 16–19 мая 2022 г. Тез. докл.* Минск: Научное электронное издание, 2021, с. 449.
5. Попов, И.А., Махянов, Х.М., Гуреев, В.М., *Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена*. Казань: Центр иннов. техн., 2009. 560 с.
6. Овсянник, А.В., *Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей*. Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2012. 284 с.

7. Гортышов, Ю.Ф., Попов, И.А., Зубков, Н.Н., Каськов, С.И., и др., Кипение воды на микроstructuredных поверхностях, *Труды Академэнерго*, 2012, № 1, с. 14.
8. Дедов, А.В., Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении, *Теплоэнергетика*, 2019, № 12, с. 18.
9. Володин, О.А., Печеркин, Н.И., Павленко, А.Н., Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях, *Теплофизика высоких температур*, 2021, т. 59, № 2, с. 280.
10. Володин, О.А., Печеркин, Н.И., Павленко, А.Н., Катаев, А.И., и др., Методы интенсификации теплообмена при кипении и испарении стекающихся пленок на пакетах горизонтальных труб. *XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену, Минск, 16–19 мая 2022 г. Тез. докл.* Минск: Научное электронное издание, 2021, с. 303.
11. Ahmad, S.W., *Combined Effect of Electric Field and Surface Modification on Pool Boiling of R-123*. PhD Thesis. Brunel University (USA), 2012. 276 p.
12. Еронин, А.А., Особенности тепловых процессов при кипении диэлектрических жидкостей в неоднородном электрическом поле. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Объединенный институт высоких температур, 2012. 17 с.
13. Benjamin, R.J. and Balakrishnan, A.R., Nucleation site density in pool boiling of saturated pure liquids: Effect of surface microroughness and surface and liquid physical properties, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1997, vol. 15, p. 32.
14. Черника, И.М., Болога, М.К., Моторин, О.В., Кожевников, И.В., Интенсивность теплообмена при кипении на модифицированных поверхностях в электрическом поле. *Материалы восьмой российской национальной конференции по теплообмену* (Москва, 17–22 октября 2022 г.), М.: Изд. МЭИ, т. 1, с. 290.

Summary

The article presents the results of experimental studies of heat transfer during boiling of a dielectric fluid in an electric field on modified surfaces obtained by electro-spark alloying. The influence of the electric field strength, electrode shape, inter-electrode distance, heat-transfer surface material, roughness parameters, and other factors on the heat transfer characteristics and the development of the boiling process was studied. A comparative analysis of the influence of the electric field and structural modification of the heat-transfer surface on heat transfer intensity is presented. Heat transfer intensification achieved was up to 3.5 times higher, compared to that at boiling on a smooth surface in the absence of a field. Based on visual observations and high-speed filming, the mechanism of boiling in an electric field on modified surfaces is discussed.

Keywords: heat exchange, boiling, heat flow, temperature difference, heat transfer coefficient, roughness, intensification, electric field