

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ В ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛ

М.К. Болога, И.В. Кожевников, О.И. Мардарский, А.А. Поликарпов

Институт прикладной физики АН Молдовы,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, mbologa@phys.asm.md

Даны сравнительные оценки условий парообразования на поверхности нагрева при кипении в отсутствие и при воздействии поля в зависимости от величины теплового потока и напряженности поля. На основе результатов киносъемки процесса кипения анализируется картина движения конвективных потоков и паровых пузырьков во взаимосвязи с интенсивностью теплообмена.

УДК 536.248.2

В работе представлены результаты исследований процесса кипения, выполненных на основе скоростной киносъемки в условиях воздействия электрического поля. В экспериментах использовалась герметичная камера с теплоотдающей поверхностью в виде нержавеющей трубки диаметром 4 мм. Высоковольтный электрод – перфорированная плоскость – установлен над поверхностью теплообмена. Теплоносителем служил гексан (температура кипения – 68,7°C). Экспериментальные результаты по кризису кипения и теплоотдаче в электрическом поле [1, 2] свидетельствуют, что ее интенсификация в поле электрических сил ослабевает с наращиванием теплового потока и практически отсутствует при развитом режиме кипения. В конвективной области и при устойчивом пленочном кипении наблюдаются высокая интенсивность теплоотдачи и возрастание критических тепловых нагрузок. С точки зрения особенностей процесса в статье рассматриваются условия парообразования с учетом действия электрического поля. Даны оценки условий парообразования на твердой поверхности нагрева при кипении в отсутствие и при воздействии поля в зависимости от величины теплового потока.

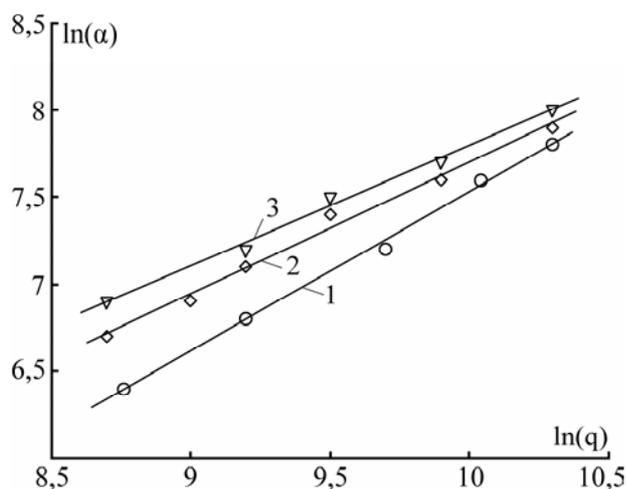


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока. E , кВ/см: 1 – 40, 2 – 60, 3 – 70

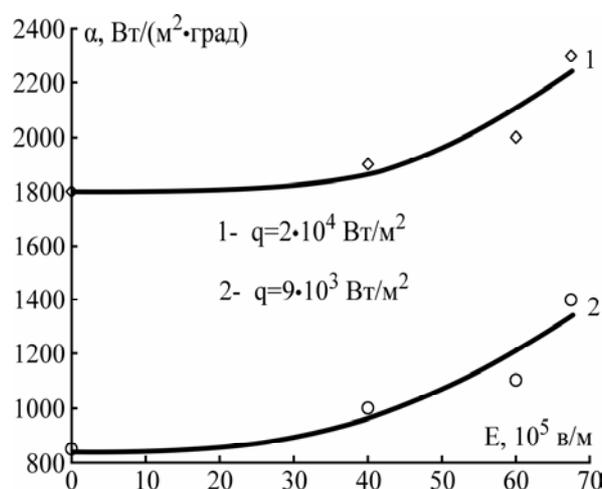


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от напряженности электрического поля

Характерные зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, напряженности внешнего электрического поля при кипении в большом объеме представлены на рис. 1, 2. С ростом напряженности поля E интенсивность теплоотдачи возрастает. Большим значениям напряженности соответствуют более высокие значения коэффициента теплоотдачи при одних и тех же значениях плотности теплового потока. В работе [1] отмечено, что при более высоких напряженностях в межэлектродном промежутке коэффициент теплоотдачи практически не зависит от плотности теплового потока. В отсутствие электрического поля в результате взаимодействия между растущим в активном центре и предшествующим паровым пузырьком происходят отрыв пузырька, диаметр которого меньше отрывного и его слияние с ранее оторвавшимися пузырьками. Таким обра-

зом, образуется серия малых пузырьков, обеспечивающих интенсивную турбулизацию пристенного жидкостного слоя. Так продолжается до тех пор, пока крупные пузырьки не удаляются от поверхности нагрева. Последующие пузырьки отрываются от центра кипения без помех. В последующем цикл отрыва паровых пузырьков повторяется, и картина кипения согласуется с условиями, описанными другими авторами ранее [3–6]. В нижней части теплообменной поверхности также происходит образование паровых пузырей, которые двигаются вверх по образующей трубчатой поверхности нагрева. При своем движении образовавшийся в начальный момент паровой пузырь сливается с новыми пузырями, растущими на боковой поверхности нагрева. В результате их слияния образуется большой паровой пузырь, размеры которого достигают 1500 мкм. Движение парового пузыря по боковой поверхности напоминает движение жидкой капли по наклонной поверхности.

Воздействие электрического поля на начальном этапе, когда величина напряженности составляет порядка 10 кВ/см, приводит к подавлению кипения только в верхней части поверхности теплообмена, при этом продолжают работать те центры, которые ранее формировали крупные паровые пузыри, но сейчас они генерируют более мелкие. На боковой и нижней поверхностях теплообмена генерируются более крупные паровые пузыри. Картина процесса напоминает условия кипения, описанные в [7, 8]. Паровые пузыри, растущие на боковой и нижней поверхностях нагрева, в условиях действия электрического поля отбрасываются по образующей в зону меньшей напряженности поля. В нижней части, под поверхностью нагрева, паровые пузыри при своем движении замедляют скорость и на некотором расстоянии остаются неподвижными. К ним присоединяются последующие растущие паровые пузыри. Начальный паровой пузырь увеличивается в размерах и всплывает вдали от поверхности нагрева.

Воздействие поля в межэлектродном промежутке приводит к “насосному эффекту” – образованию микроциркуляционных течений вблизи поверхности нагрева. Вследствие этого образуются микроциркуляционные течения, направленные вниз, в сторону уменьшения напряженности поля, а паровой пузырь под действием электрических сил уменьшается в размерах вплоть до подавления. Диэлектрическая жидкость прижимается к поверхности нагрева, образуя тонкий движущийся слой у поверхности. Возникающие течения жидкости совместно с процессом испарения в мелких пузырьках (порядка 2–3 микрон) вызывают резкий спад температуры стенки, тем самым устраняя неравномерное ее распределение вдоль поверхности нагрева, которое наблюдалось при кипении в отсутствие электрического поля. Анализ результатов показал, что скорость микроциркуляционных течений резко возрастает с ростом напряженности электрического поля.

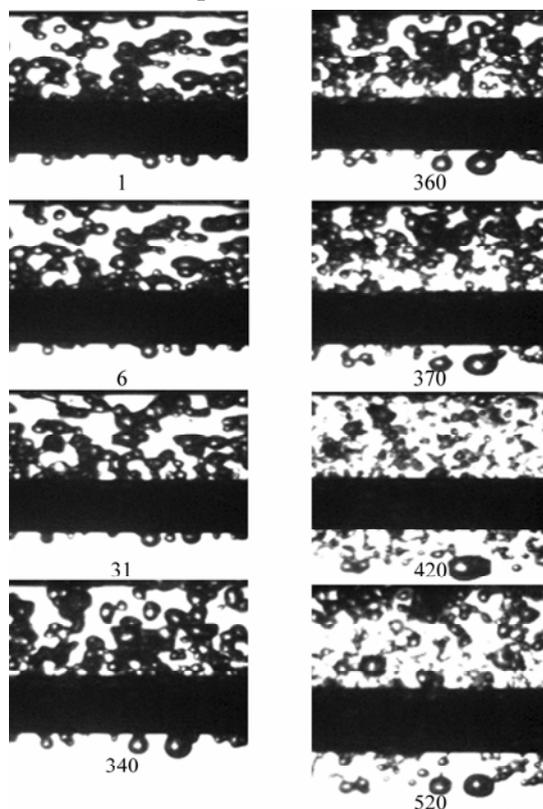


Рис. 3. Изменение диаметров и направления движения паровых пузырей в зависимости от роста напряженности поля E ; $q = 1,4 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$; скорость кино съемки – 2200 кадр./с

Сравнительный анализ результатов киносъемки процесса кипения под воздействием электрического поля при постоянстве подаваемого теплового потока q и изменении напряженности E (рис. 3) показал, что паровые пузыри в отсутствие поля растут до диаметра 700 мкм (при скорости роста 70 мм/с). При этом в отдельных центрах наблюдается генерация паровых пузырьков диаметром 200 мкм. В начальный момент повышения напряженности изменяются термодинамические течения, связанные с силовым действием поля. В верхней части теплоотдающей поверхности происходит подавление кипения. Уменьшаются размеры паровых пузырей до 400 мкм (при скорости роста 250 мм/с) с дальнейшим подавлением центров кипения. В центрах, где ранее в отсутствие поля имела место генерация пузырей диаметром 200 мкм, при воздействии поля иногда наблюдаются жидкие конусные образования высотой порядка 80 мкм. С боковой и нижней частей поверхности нагрева за счет сил электрического поля пузырьки отбрасываются по радиусу на небольшое расстояние от поверхности. Так, в нижней части поверхности теплообмена, сформированные в центрах кипения паровые пузырьки диаметром 180 и 350 мкм, отклоняются на расстояние 2,3 и 0,8 мм соответственно.

При малых напряженностях (порядка 4–5 кВ/см) конвективные волны направлены вверх и по мере возрастания напряженности поля возмущения простираются вниз и на поверхности нагрева, обращенной к высоковольтному электроду, жидкость остается невозмущенной. Следовательно, электрическое воздействие значительно преобладает над термической конвекцией, вытесняющей горячие слои жидкости вверх.

Анализ данных киносъемки показывает, что для интенсификации теплообмена и удаления паровой фазы из области, прилегающей к поверхности нагрева, необходимо учитывать как расположение высоковольтного электрода относительно теплоотдающего элемента, так и величину напряженности электрического поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болога М.К., Смирнов Г.Ф., Дидковский А.Б., Климов С.М. *Теплообмен при кипении и конденсации в электрическом поле*. Кишинев: Штиинца, 1987. 240 с.
2. Лазаренко Б.Р., Бабой Н.Ф., Болога М.К. *Интенсификация теплообмена и развитие процесса кипения в электрическом поле. Тепло- и массоперенос*. Минск, 1972. Т. 2. Ч. 1. С. 210–214.
3. Толубинский В.И. *Теплообмен при кипении*. Киев: Наукова думка, 1980. 315 с.
4. Кутателадзе С.С., Накоряков С.С. *Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах*. Новосибирск: Наука, 1984. 304 с.
5. Кутателадзе С.С. *Основы теории теплообмена*. Новосибирск: Наука, 1970. 659 с.
6. Кутепов А.Л., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. *Гидродинамика и теплообмен при парообразовании*. М.: Высшая школа, 1983. 447 с.
7. Воробьев В.С., Малышенко С.П. Образование новой фазы в электрических полях. *Журнал экспериментальной теоретической физики*. 2001, **120**(4), 863.
8. Воробьев В.С., Малышенко С.П., Петрин А.Б. Об эффекте полевых ловушек при кипении диэлектрических жидкостей в неоднородных электрических полях. *Теплофизика высоких температур*. 2005, **43**(2), 1–7.

Поступила 05.07.11

Summary

Comparative estimations are given of the conditions of vapor generation on the heating surface when boiling, both in the field and without it, depending on the value of the heat flow and the field strength. The pattern of the motion of convective flows and vapor bubbles in connection with the heat transfer intensity is analyzed on the basis of high-speed filming of the boiling process.