

КРИТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОВАЯ НАГРУЗКА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ

Е. В. Анохина

Ростовская-на-Дону государственная академия сельскохозяйственного машиностроения

Интерес ученых и инженеров к изучению кипения обусловлен тем, что во многих отраслях промышленности, прежде всего в энергетической, кипение – основной технологический процесс. Интенсивность теплообмена при кипении определяет стоимость, размеры и производительность оборудования. В связи с явлением кризиса кипения возникает проблема надежной и безопасной работы теплонапряженных поверхностей, поэтому исследование этого процесса является актуальной научной и технической проблемой.

Согласно [1] наличие постоянно изменяющихся и неопределенных границ, а также межфазного обмена при кипении приводит к трудностям в математическом описании и не позволяет применять прямое численное моделирование. Двухфазные системы являются особыми объектами, их анализ требует рассмотрения процесса в целом. Одно из перспективных направлений в исследовании кипения было разработано в трудах Лабунцова Д. А. [2]. Он считал, что в любом самом сложном явлении можно и необходимо выявить главные факторы, число которых, как правило, невелико. Применение метода аналогий Максвелла для анализа процесса кипения помогает выявить основные величины, от которых зависит критическая тепловая нагрузка при насыщенном кипении жидкостей.

Кружилин Г. Н. [3,4] исследовал движение газа через слой жидкости в паровых котлах. Пар в виде отдельных пузырьков и струй проходит через слой воды и, разрывая поверхность испарения, поступает в паровой объем барабана котла. При этом оторванные капли жидкости поднимаются над поверхностью испарения или падают вниз обратно, или попадают в паропровод. Для теоретического анализа данной задачи автор применил метод размерностей. Оказалось, что влажность газа связана с напряженностью парового объема следующим образом

$$W = AD^4.$$

Найдено, что в данном случае наиболее существенным является критерий

$$\dot{I} = \frac{\rho_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}}{g\sigma} D^4. \quad (2)$$

где ρ_1 – плотность жидкости, ρ_2 – плотность пара, σ – поверхностное натяжение жидкости. Этот вывод согласуется с экспериментальными данными многих авторов [4] по барботажу пара через воду, воздуха через керосин.

Напряженность парового объема D напрямую связана со скоростью пара u , величина Π имеет некоторое постоянное значение, поэтому критерий (2) можно переписать в следующем виде:

$$\Pi = \frac{\rho_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}}{g\sigma} u^4 = \text{const}. \quad (3)$$

Скорость движения паровой фазы выразим из уравнения (3):

$$u = k_4 \sqrt{\frac{g\sigma}{\rho_2}} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}. \quad (4)$$

Изменение режимов течения потока при барботаже газа через слой жидкости приводит к следующему явлению. Оказалось, что существует некоторая предельная скорость газа, выше которой струи газа перестают двигаться устойчиво в жидкости. Этот верхний предел называют точкой «погружения» или «затопления» [5]. Для данного процесса величина скорости «затопления» определяется как скоростью газа, движущегося от поверхности, так и скоростью жидкости, направляющейся к поверхности. Если нам задана любая скорость газа, то имеется вполне определенная скорость жидкости, выше которой заполненная струя газа будет затопляться.

Механизм явления затопления (захлебывания) при барботаже довольно подробно описан в работе [6]. Оно происходит в любом устройстве, в котором одна жидкость протекает прерывисто сквозь несмешивающуюся вторую. Дисперсная фаза, когда проходит сквозь непрерывную фазу, имеет меньшую скорость, чем на входе. Скорости сред, текущих навстречу друг другу независимы, поэтому при быстром их синхронном увеличении происходит затопление. Если оно происходит, то возможен один из двух случаев. Первый – прохождение непрерывной фазы задерживается, а дискретная фаза дает задний ход, второй – небольшая задержка в движении любой из сред становится достаточной, чтобы другая заполнила имеющийся в сосуде объем, при этом одна из фаз выливается более или менее сильно из аппарата.

Таким образом, затопление при барботаже происходит, когда встречные потоки жидкости и газа достигают таких скоростей, при которых жидкость и газ начинают конкурировать за свободный объем. Фотографическое исследование кипения [7] показало, что при околоскритических тепловых нагрузках от поверхности нагрева движутся струи пара, а жидкость течет в противоположном направлении – к поверхности нагрева. Кризис кипения наступает, если на теплообменной поверхности образуется больше пара по сравнению с тем его количеством, которое могут перенести устойчивые паровые струи.

Кризис кипения – это гидродинамическое явление, которое можно трактовать аналогично явлению затопления. Критическая тепловая нагрузка достигается, когда скорость паровой фазы примет максимальное (критическое) значение [5]. Подобно экспериментам [8] жидкость будет отброшена от поверхности нагрева, т. е. произойдет отжим жидкости паром.

Г. Н. Кружилин при рассмотрении задачи о влажности пара при барботаже в паровых котлах сделал вывод, что по уравнению (2) можно найти зависимость допустимой (критической) нагрузки парового объема от давления в случае прохода пара через свободный объем. В условиях захлебывания при барботаже, которые соответствуют кризису кипения, влажность пара достигает вполне определенного (критического) значения, и поэтому выражение (3) можно переписать в виде:

$$\frac{\rho_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}}{g\sigma} u_{кр}^4 = const. \quad (5)$$

Так получается важная в теории кризиса кипения «формула четвертой степени» для скорости движения паровой фазы.

Исходя из рассмотрения развития процессов кипения и барботажа, механизмы кризиса кипения и захлебывания при барботаже одинаковы. Тогда из уравнения (5) можно получить выражение для скорости движения паровой фазы:

$$u_{кр} = \frac{q_{кр}}{\rho_2 L} = \Pi_1 \frac{\sqrt[4]{g\sigma}}{\sqrt[4]{\rho_2} \sqrt{\rho_1}}. \quad (6)$$

Для критической тепловой нагрузки выражение (6) можно переписать:

$$q_{кр} = \Pi_1 L (\rho_2)^{\frac{5}{8}} \sqrt[4]{\sigma g} \sqrt{\rho_1}. \quad (7)$$

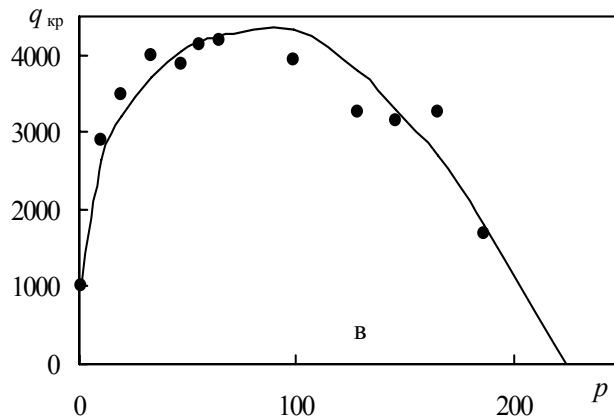
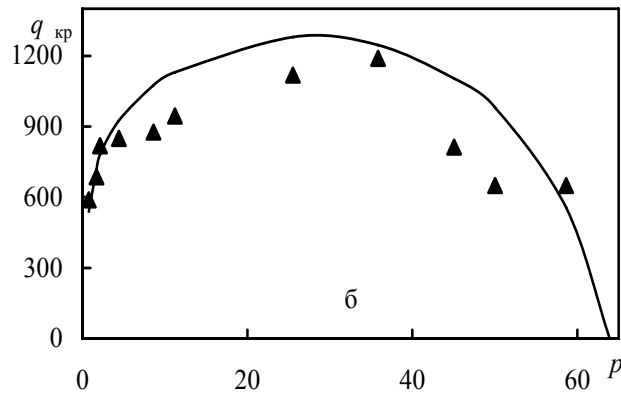
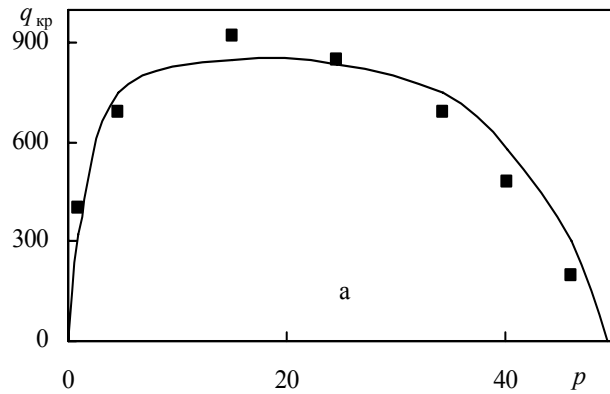


Рис. 1. Критическая тепловая нагрузка $q_{кр}$ при насыщенном кипении бензола (а), этанола (б) и воды (в) в зависимости от давления p ; кривые – расчет по (7); точки – экспериментальные данные авторов [9] (а), [10] (б) и [11] (в). Давление p выражено в бар, критическая тепловая нагрузка $q_{кр}$ в кВт/м².

На рис. 1 для сравнения представлены результаты расчета критической тепловой нагрузки $q_{кр}$ по формуле (7) и экспериментальные данные, полученные при кипении бензола, этанола и воды разными авторами в широком диапазоне давлений. Постоянная $П_1$ оказалась равной 0.2–0.3. Видно, что согласование расчетных данных с экспериментом удовлетворительное в широком диапазоне давлений. Использование аналогии процессов барботажа и кипения при описании их характеристик является обоснованным.

Выводы

1. Подобие процессов барботажа и кипения подтверждается тем, что эти явления описываются одинаковыми закономерностями. Так, критическую (максимальную) скорость движения паровой фазы через дырчатый лист при барботаже и от поверхности нагрева при кипении можно рассчитать по формуле (5).

2. Применение метода аналогии к процессам барботажа и кипения позволяет получить теоретическое соотношение для критической тепловой нагрузки (7) в широком интервале давлений для различных органических жидкостей и воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ягов В. В. Теплообмен при пузырьковом кипении – возможности теоретического анализа// Тр. 4-го Минского Международного форума по тепло- и массообмену. 2000. Т.5. С. 3–12.

2. Лабунцов Д. А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. М.: Изд-во МЭИ, 2000.

3. Кружилин Г.Н. Теория уноса и сепарации влаги в паровых котлах// Советское котлотурбостроение. 1945. №1. С.11–16.

4. Кружилин Г.Н. Теория уноса и сепарации влаги в паровых котлах (окончание) // Советское котлотурбостроение. 1945. №4. С.21–25.

5. Zuber N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer. Ph. D. Thesis. Los Angeles, University of California, 1959.

6. Elgin J. G. and Weiss F. B. Liquid holdup and flooding in packed towers// Ind. Eng. Chem. 1939. Vol. 31. Pp. 435–447.

7. Анохина Е. В. Фотографическое исследование кризиса теплообмена при поверхностном кипении жидкостей. Деп. в ВИНТИ 25.12.96, №3802-В96. Ростов-на-Дону, Ростовская–на–Дону государственная академия сельскохозяйственного машиностроения, 1996.–10 с.

8. Кружилин Г. Н., Лыков Е. В. Критическая тепловая нагрузка при кипении жидкости в большом объеме// ЖТФ. 2000. Т. 70, вып. 2. С. 16–19.

9. Кружилин Г. Н. Теплофизика в тепловой и ядерной энергетике: Сб. работ/ Под ред. Ю. Г. Назмеева. Казань: Изд-во Казан. фил. МЭИ, 1998.

10. Cicheli M. T. and Bonilla S. F. Heat transfer to liquid boiling under pressure// Trans. AIChE. 1945. Vol. 41, Pp. 755–762.

11. Казакова Е. А. Влияние давления на возникновение первого кризиса при кипении воды на горизонтальной пластине// Вопросы теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества. М.–Л., 1953. С. 92–111.

