

Экспериментальное исследование критической тепловой нагрузки при кипении бинарных смесей жидкостей

© Е.В. Анохина

Ростовская-на-Дону государственная академия сельскохозяйственного машиностроения,
344023 Ростов-на-Дону, Россия
e-mail: anohina@donpac.ru

(Поступило в Редакцию 24 июля 2008 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования критической тепловой нагрузки q_{cr} при насыщенном и ненасыщенном кипении в большом объеме при атмосферном давлении в зависимости от состава для водных смесей этанола, изопропанола, *n*-бутанола, изобутанола и изоамилового спирта.

PACS: 44.35.+c, 47.51.+a

Введение

Кипение жидкостей является одним из важнейших процессов, с помощью которого получают пар, а следовательно и движущую силу, для последующего использования в энергетике и промышленности. Поэтому всестороннее исследование этого явления весьма актуально. Особого внимания требует вопрос об изучении максимально возможных тепловых нагрузок, так как с ними связана проблема интенсификации теплообмена в аппаратах и установках. Экспериментальное определение этой величины чрезвычайно важно. С помощью максимальных (критических) тепловых нагрузок находят предел безопасной работы тепловых агрегатов, например атомного реактора. Следовательно, их нельзя проектировать, если неизвестна максимально возможная тепловая нагрузка. По указанной причине в настоящей работе основное внимание уделяется экспериментальному исследованию величины тепловой нагрузки. Она непосредственно связана с кризисом теплоотдачи [1]. Другой аспект изучаемой проблемы — это поиск жидкостей, в которых критическая тепловая нагрузка q_{cr} при их кипении может иметь повышенное значение.

Данная работа посвящена экспериментальному определению абсолютной величины q_{cr} при насыщенном и ненасыщенном кипении водных растворов этанола, изопропанола, *n*-бутанола, изобутанола, изоамилового спирта и глицерина в зависимости от их концентрации при атмосферном давлении.

В литературе [2–6] приводятся опытные данные по измерению q_{cr} при кипении водных растворов органических жидкостей. Российские и зарубежные исследователи в качестве поверхности нагрева использовали проволоку диаметром 0.4–0.5 mm. Предметом их изучения было насыщенное кипение бинарных смесей. Критическая тепловая нагрузка при насыщенном кипении водных бинарных смесей органических жидкостей, таких как метанол, этанол, *n*-пропанол, *n*-бутанол, зависит от концентрации смеси. Для этих жидкостей было обнаружено [2,3] повышение в 2–3 раза величины

критической тепловой нагрузки по сравнению с q_{cr} для чистых компонентов при насыщенном кипении. Попытки объяснить эту зависимость с точки зрения термодинамики растворов не привели к каким-то законченным результатам. Естественно, возникает вопрос, будут ли приведенные в [1–5] закономерности справедливы для меньших диаметров цилиндрического нагревателя, а также в случае, когда ядро жидкости недогрето до температуры насыщения.

Методика проведения опытов

Для изучения тепловых явлений при кипении жидкостей был использован метод нагретой проволоки. Использование теплоотдающих поверхностей, нагреваемых электрическим током, дает результаты, полезные для понимания работы тепловыделяющих элементов ядерных реакторов [7]. Опыты по кипению проводились на горизонтально расположенных цилиндрических нагревателях. В качестве поверхности нагрева служила медная проволока диаметром 65 μm . Насыщенное и ненасыщенное кипение жидкости исследовалось в закрытом сосуде объемом 150 ml. Температура ядра жидкости фиксировалась термпарой. Опыты по ненасыщенному кипению проводились при температуре ядра жидкости 25°C. Для поддержания температуры насыщения ядра жидкости включался внешний электрический подогреватель.

Чтобы поддерживать одинаковые условия проведения опытов при насыщенном кипении бинарных смесей вследствие преимущественного испарения легкокипящего компонента на крышке сосуда был установлен конденсатор. Конденсация осуществлялась водопроводной водой.

Практика показывает, что для стабилизации кипения и получения хорошей статистики опытов необходимо нагревать тепловыделяющий элемент постоянным током [8]. Электропитание опытного нагревателя осуществлялось от батареи аккумуляторов напряжением 12 V. Ток на экспериментальном участке изменялся с помощью переменного сопротивления. Ток и падение на-

пряжения на опытном нагревателе фиксировалось самописцем типа Н3030 класса точности 1.0. Калибровка показаний самописца производилась вольт-амперметром типа М256 класса точности 0.5. Скорость записи этих данных могла изменяться. Она была в наших опытах 1 и 5 мм/с.

Тепловая нагрузка в ходе опытов определялась по следующей формуле:

$$q = \frac{UI}{S} = \frac{UI}{\pi dl},$$

где U — падение напряжения на цилиндрическом нагревателе, В; I — ток нагрева, А; S — площадь нагревателя, m^2 ; d — диаметр нагревателя, м; l — длина нагревателя.

В качестве объектов исследования были использованы водные растворы ряда спиртов. В смесях жидкостей, которые образуют азеотропный состав, исследовалась зависимость критической тепловой нагрузки от концентрации при малом содержании органического компонента. Выбор слабых водных растворов объясняется важностью технических свойств указанных жидкостей, они широко используются в различных технологических процессах. Чтобы надежно получить зависимость критической удельной тепловой нагрузки от концентрации органического компонента, следовало поддерживать все условия опытов идентичными и проводить измерения величины q_{cr} при одинаковых условиях проведения опыта от 12 до 24 раз, а затем бралось среднее значение от всех проведенных опытов. Таким образом, на опытных кривых зависимости критической плотности теплового потока от концентрации органического компонента каждая точка получена в результате усреднения данных по q_{cr} в нескольких экспериментах.

Для приготовления бинарных смесей использовались чистый *n*-бутанол, химически чистый изопропанол, этанол, чистый для анализа изобутанол, изоамиловый спирт.

Результаты опытов и обсуждение

На рис. 1 представлена экспериментально полученная зависимость критической тепловой нагрузки от состава смеси для системы этанол–вода. Кривая с более высокими значениями q_{cr} соответствует ненасыщенному кипению. Максимальная величина критической тепловой нагрузки получена при 17% по весу этанола как при насыщенном, так и при ненасыщенном кипении. Для водных смесей этанола при насыщенном кипении и концентрации 17% значение q_{cr} для бинарной смеси увеличивается в 2.8 раза по сравнению с q_{cr} для воды, а при ненасыщенном — в 1.5 раза.

На рис. 2 представлены данные зависимости критической тепловой нагрузки от концентрации органического компонента для системы изопропанол–вода. Результаты аналогичны только что описанным, т. е. критическая тепловая нагрузка зависит от концентрации существенным

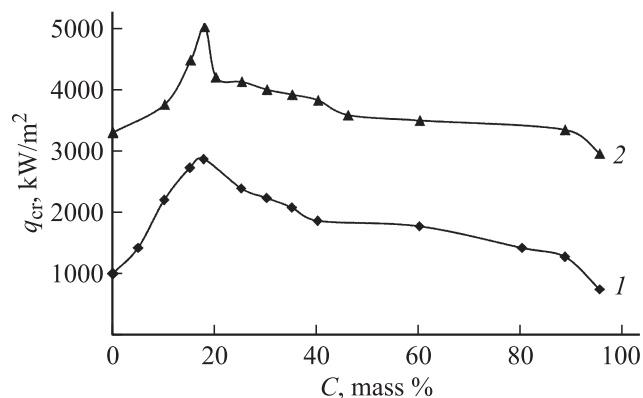


Рис. 1. Зависимость критической тепловой нагрузки от концентрации этанола (С) при насыщенном (1) и ненасыщенном (2) кипении в большом объеме в условиях атмосферного давления.

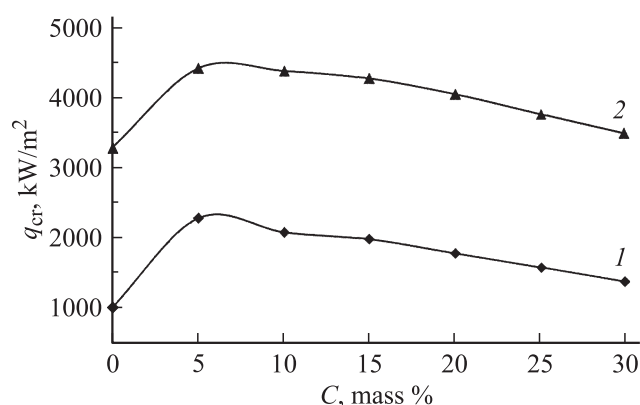


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для (2) изопропанола.

образом — при концентрации около 5% изопропанола претерпевает максимум и затем уменьшается. Для водных смесей изопропанола при насыщенном кипении и концентрации 5% значение q_{cr} для бинарной смеси увеличивается в 2.3 раза по сравнению с q_{cr} для воды, а при ненасыщенном — в 1.3 раза. Бинарная система изопропанол–вода относится к классу растворов, характеризующихся неорганической взаимной растворимостью.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости $q_{cr} = f(C)$ для двойных систем *n*-бутанол–вода, а также изобутанол–вода. Эти смеси характеризуются ограниченной взаимной растворимостью. Область несмешиваемости не была исследована. В указанной области жидкость расслаивается и можно выделить три участка: первый соответствует положению нагревателя в растворе *n*-бутанола в воде, второй — переходный и третий — раствор воды в *n*-бутаноле. Максимальная величина q_{cr} обнаружена для концентрации 1.5% изобутанола и *n*-бутанола. Для водных смесей изобутанола и *n*-бутанола при насыщенном кипении и концентрации 1.5% значение q_{cr} для бинарной

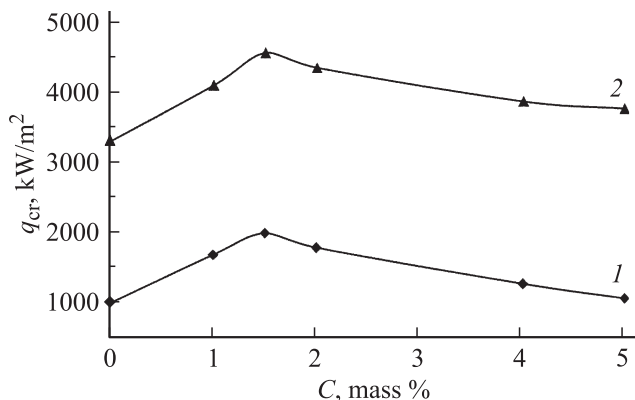


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для (2) *n*-бутанола.

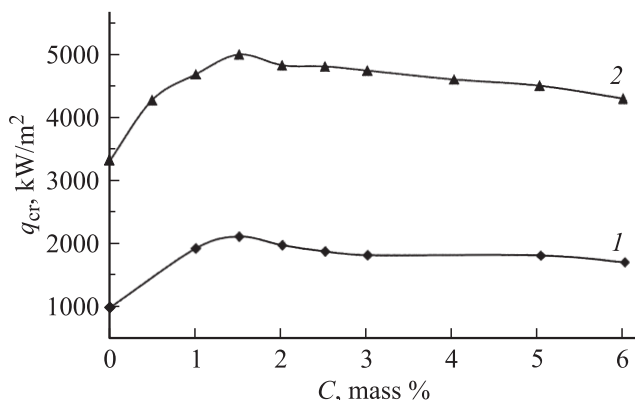


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для (2) изобутанола.

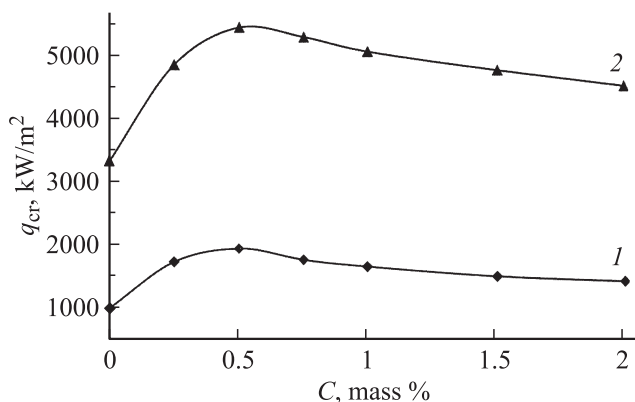


Рис. 5. То же, что на рис. 1, для (2) изоамилового спирта.

смеси увеличивается в 2 раза по сравнению с q_{cr} для воды, а при ненасыщенном — в 1.4 раза.

Результаты для системы изоамиловый спирт–вода (рис. 5) аналогичны. Для водных смесей изоамилового спирта при насыщенном кипении и концентрации 0.5% значение q_{cr} для бинарной смеси увеличивается в 2 раза по сравнению с q_{cr} для воды, а при ненасыщенном — в 1.7 раза.

Из условий прекращения пузырькового кипения следует, что процесс определяется не только физическими свойствами жидкости, но и гидродинамическим режимом течения жидкости и пара [2]. Визуальные наблюдения показывают, что кипение воды осуществляется более крупными пузырями, которые довольно легко нарушают гидродинамическую устойчивость струек жидкости, направленных к нагревателю. Кипение изученных растворов сопровождается образованием огромного числа очень мелких пузырьков, благоприятствующих течению струек к поверхности нагрева и затрудняющих процесс слияния паровых пузырей и образованию сплошной паровой пленки.

Заключение

Экспериментально исследована зависимость критической тепловой нагрузки при насыщенном и ненасыщенном кипении в большом объеме от состава бинарных водных смесей этанола, изопропанола, *n*-бутанола, изобутанола, изоамилового спирта и глицерина.

Обнаружено, что величина q_{cr} существенно зависит от состава раствора и ее абсолютное значение для некоторых бинарных смесей существенно повышается по сравнению с чистыми компонентами как для насыщенного, так и для ненасыщенного кипения.

Максимальная критическая тепловая нагрузка на зависимости $q_{cr} = f(C)$ наблюдается при одинаковой концентрации органического компонента при насыщенном и ненасыщенном кипении жидкостей.

Для большинства изученных систем при насыщенном кипении критическая тепловая нагрузка повышается по сравнению с q_{cr} для воды в 2 раза, а при ненасыщенном в 1.3–1.8 раза.

Список литературы

- [1] Кружилин Г.Н., Лыков Е.В. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 2. С. 16–19.
- [2] Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- [3] Van Wijk W.R., Vos A.S., Van Stralen S.J.D. // Chem. Eng. Sci. 1956. Vol. 5. N 1. P. 68–80.
- [4] Fujita Y., Bai Q. // Eurotherm Seminar N48: Pool Boiling 2. Pisa: Edizioni ETS, 1996. P. 319–326.
- [5] Fujita Y., Bai Q., Tsutsui M. // Trans. Jpn. Mech. Eng. B. 1994. Vol. 60. N 578. P. 3434–3439.
- [6] Фастовский В.Г., Артым Р.И. // Теплоэнергетика. 1958. № 8. С. 74–78.
- [7] Бонилла Ч. Вопросы теплопередачи в ядерной технике. М.: Госатомиздат, 1961. 314 с.
- [8] Lykov E.V. // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1972. Vol. 15. P. 1603–1614.