

УДК 536.24

*А. В. Овсянник, Д. А. Дробышевский*

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, пр. Октября, 48, Гомель, Беларусь, 246746

**ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ АЦЕТОНА И ЭТИЛОВОГО СПИРТА НА НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ**

*Приводятся результаты экспериментов по исследованию влияния давления насыщения на теплообмен при кипении этилового спирта и ацетона на продольно-ребреных поверхностях с различным профилем ребра. Получены графические зависимости:  $\Delta T = f(p_n)$ ,  $\alpha = f(p_n/p_{кр})$  и определен показатель степени влияния давления ( $k$ ) на теплообмен при кипении.*

**Ключевые слова:** Кипение — Теплообмен — Ребро — Профиль — Давление.

*The results of experiments investigation the saturation pressure effect on the heat exchange during boiling of acetone and ethyl spirite on the sides ribbed longitudinally with different rib profile are presented here. The plots are obtained here:  $\Delta T = f(p_n)$ ,  $\alpha = f(p_n/p_{кр})$  and the indicator of severity of exposure to heat exchange while boiling process by pressure influence is calculated here too.*

**Keywords:** Boiling — Heat exchange — Rib — Profil — Pressure.

**I. ВВЕДЕНИЕ**

Для расчета теплообменных аппаратов представляет определенный интерес знание закономерностей теплообмена при пузырьковом кипении ацетона и этилового спирта в широком диапазоне изменения давления насыщения. С целью выяснения закономерностей теплоотдачи при кипении проводились опыты в условиях свободного движения на горизонтальных продольно-ребренных трубчатых поверхностях нагрева из дюралюминия Д16 (диапазон давлений от 1 до 5 бар). При проведении экспериментов была принята методика, разработанная ранее [1, 2]. Контроль давления насыщения осуществлялся с помощью мановакуумметра МВПЗА-УУ2 с точностью  $\pm 0,20 \cdot 10^3$  Па. Тепловой поток ( $q = 10 \div 63$  кВт/м<sup>2</sup>) подводился к образцам электрическим нагревателем, установленным в цилиндрической полости образца. Перепад температуры между поверхностью нагрева и жидкостью измерялся дифференциальными термопарами, один спай которых располагался в образце, а второй — в жидкости. Сбор и обработка информации производилась автоматизированным комплексом, созданным на базе аналого-цифрового преобразователя ADC32-1533 фирмы ANALOG DEVICES, программой обработки данных ADC32GD 1.0. Визуальное наблюдение за процессом кипения ацетона и этилового спирта на горизонтальных трубках показали, что в исследованном диапазоне изменения плотности теплового потока возможны три режима теплообмена: свободная конвекция, неразвитое и развитое кипение (рис. 1, 2, 3).

Протяженность областей существования

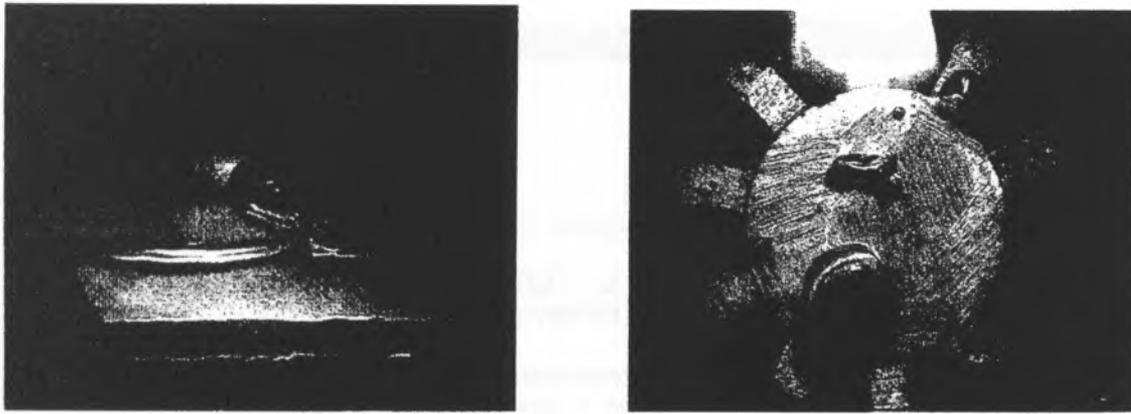
данных режимов зависит от типа внешней поверхности трубы и от давления насыщения. Известно, что величина коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  при кипении жидкостей зависит от давления, причем степень влияния давления по-разному проявляется в зависимости от вида теплоотдающей поверхности и теплотехнических свойств жидкости.

**ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

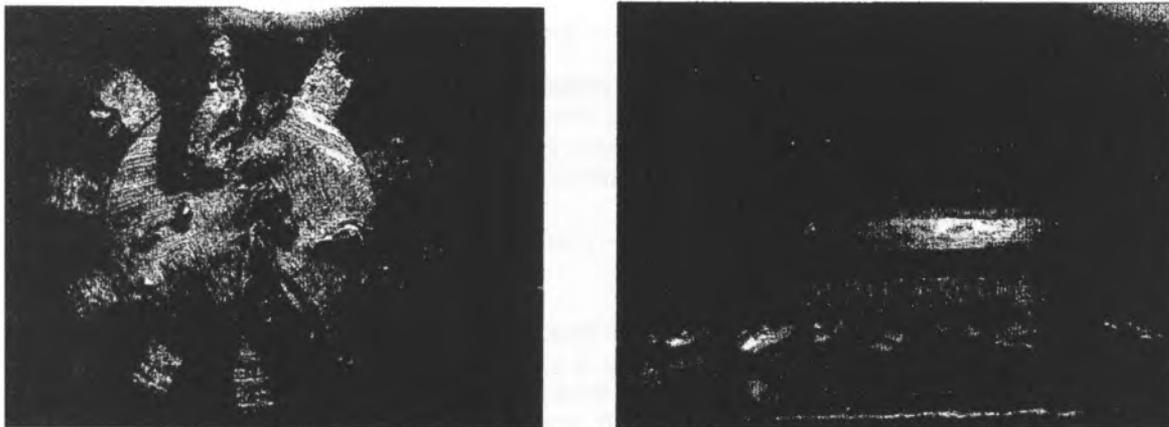
Анализ ряда экспериментальных работ свидетельствует о существенном влиянии давления на величину перегрева и интенсивность теплоотдачи. На рис. 4 представлены экспериментально полученные зависимости перегрева теплоотдающей поверхности  $\Delta T$ , при развитом пузырьковом кипении ацетона и этилового спирта, от давления паров насыщения  $p_n$  на поверхностях с продольным типом ребрения.

Как видно из рисунка, при кипении ацетона и этилового спирта в условиях большого объема на ребренных поверхностях перегрев при развитом пузырьковом кипении уменьшается с возрастанием давления, что качественно согласуется с результатами большинства экспериментальных исследований по кипению жидкостей на развитых поверхностях. Поскольку влияние давления на интенсивность теплообмена, как отмечено выше, зависит от области рабочих давлений, более корректным будет представление опытных данных в виде зависимости  $\alpha = f(p_n/p_{кр})$ .

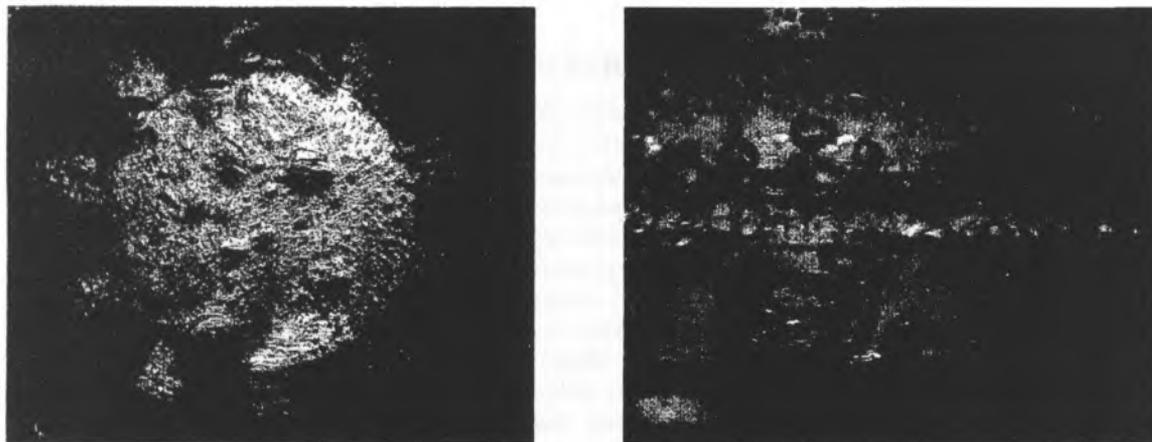
На рис. 5 приведены результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента теплоотдачи от давления насыщения при кипении ацетона и этилового спирта на ребренных поверхностях. Данная зависимость показывает, что  $\alpha$  непрерывно возрастает с увеличением давления.



*Рис. 1. Неразвитое кипение при  $10 < q < 20$  кВт/м<sup>2</sup>*



*Рис. 2. Развитое кипение при  $20 < q < 40$  кВт/м<sup>2</sup>*



*Рис. 3. Развитое кипение при  $40 < q < 63$  кВт/м<sup>2</sup>*

Такой ход  $\alpha = f(p)$  объясняется тем, что с увеличением давления уменьшается величина диаметра элемента, который при данном значении  $\Delta T$  может явиться центром зарождения паровой фазы.

Следовательно, с увеличением давления облегчаются условия зарождения паровых пузырей на теплоотдающей поверхности. При понижении давления, наоборот, поверхность сдвигается центрами парообразования, поэтому зарождения на ней паровых пузырей данно-

го радиуса требуется более высокий перегрев жидкости или более высокое значение удельного теплового потока.

На основании проведенных экспериментальных исследований был определен показатель степени в соотношении  $\alpha = f(p_w/p_{кр})^k$  и выявлено влияние на него различных факторов, определяющих интенсивность теплоотдачи при кипении. Одним из параметров, оказывающих существенное влияние на значение  $k$ , является плотность теплового потока. На рис. 5 показаны экспериментально полученные зависимо-

сти значений показателя степени  $k$  от плотности теплового потока  $q$  для продольно ребренных образцов с различной геометрией ребра. Из рисунка 3 видно, что с повышением плотности теплового потока степень влияния давления

снижается. Это можно объяснить уменьшением при возрастании давления перегрева, необходимого для вскипания жидкости и заполнения паром межреберного пространства.

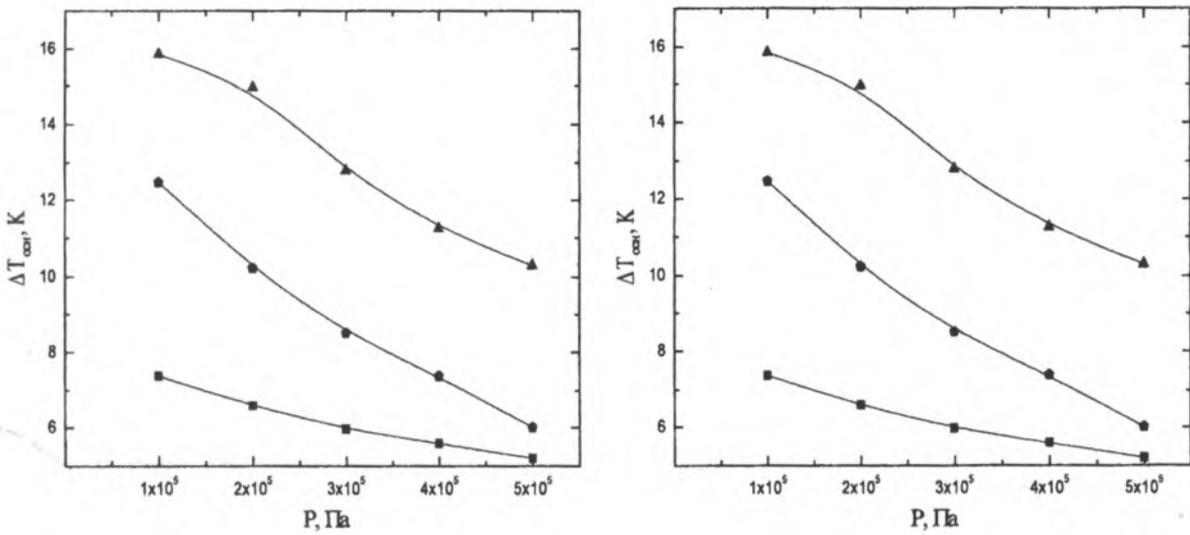


Рис. 4. Зависимость  $\Delta T = f(p, \mu)$  (● – ацетон; ○ – этиловый спирт)

- △ , ▲ - продольное треугольное ребрение;
- ◇ , ◆ - продольное трапециевидное ребрение.
- , ■ - продольное прямоугольное ребрение;

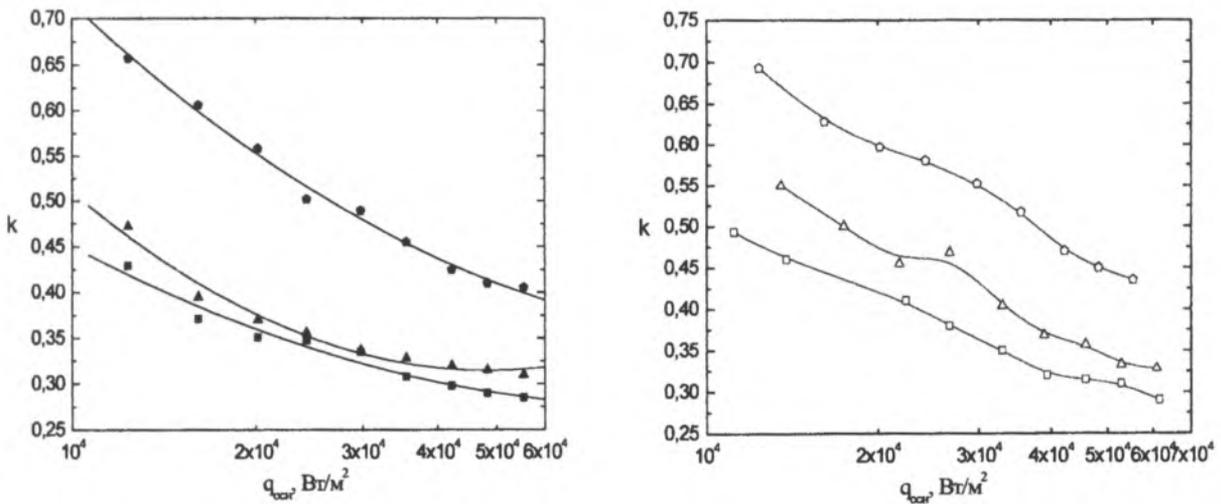


Рис. 5. Зависимость показателя степени  $k$  в соотношении  $\alpha = f(p_n/p_{кр})^k$  от плотности теплового потока  $q$  при кипении ● – ацетона и ○ – этилового спирта.

- △ , ▲ - продольное треугольное ребрение;
- ◇ , ◆ - продольное трапециевидное ребрение.
- , ■ - продольное прямоугольное ребрение;

По мере возрастания плотности теплового потока (или перегрева теплоотдающей поверхности) кипение начинается, вначале на нижней образующей образца, затем на всей поверхности. Однако очевидно, что для каждого давления существует граничный перегрев поверхности  $\Delta T_{ГР}$  начиная с которого подавляющее количество центров парообразования ребренной

поверхности становятся активными. При  $\Delta T > \Delta T_{ГР}$  активизируются центры очень малых размеров, количество которых относительно невелико. Из-за сравнительно небольшого прироста количества активных центров парообразования увеличение интенсивности теплоотдачи незначительно.

Поскольку с увеличением давления значения  $\Delta T_{ГР}$  снижается, то при малых тепловых потоках

влияние давления возрастает по сравнению с большими значениями  $q$ . При  $\Delta T > \Delta T_{гр}$  достигается примерное равенство активных центров парообразования, что приводит к слабому или вообще отсутствию влияния давления на теплообмен. Приведенные выше рассуждения позволяют обосновать ослабление степени влияния давления на интенсивность теплоотдачи с ростом теплового потока. Как отмечено выше, степень влияния давления связана с темпом активации центров парообразования (оребрение, шероховатость, пористость и т. д.). Для структур, имеющих широкий диапазон активных центров парообразования, это влияние проявляется сильнее, по сравнению с гладкой поверхностью [3, 4], поскольку с изменением давления насыщения изменяется количество центров парообразования.

Интенсивность теплоотдачи при кипении зависит также и от теплофизических свойств жидкости, которые по мере изменения давления (и температуры) насыщения существенно меняются. С увеличением коэффициента теплопроводности жидкости теплоотдача повышается, поскольку основной поток тепла от стенки воспринимается жидкой, а не паровой фазой. С увеличением вязкости теплоотдача, наоборот, уменьшается, так как уменьшается интенсивность перемешивания жидкости, обусловленная парообразованием. Зависимость  $\alpha$  от  $p$  для различных жидкостей различна. В работе [5, 6] показано, что эта зависимость для ацетона, этилового спирта и фреона больше, чем для воды. Однако в безразмерных координатах она будет одинакова для ряда жидкостей.

## ВЫВОДЫ

1. Коэффициент теплоотдачи непрерывно возрастает с увеличением давления насыщения вследствие облегчения условия зарождения паровых пузырей на теплоот-

дающей поверхности.

2. При увеличении плотности теплового потока степень влияния давления насыщения снижается из-за увеличения величины перегрева, необходимого для вскипания жидкости и снижение степени увеличения активных центров парообразования.
3. Для оребренных поверхностей степень влияния давления проявляется сильнее, нежели на гладкой поверхности из-за большего количества активных центров парообразования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Овсянник А. В.** Некоторые особенности кипения жидкостей в горизонтальных кольцевых каналах // Теплообмен — ММФ-2000: Труды 4-го Минского международного форума по тепло- и массообмену. — Минск: АНК ИТМО НАНБ, 2000. — Т. V. — С. 193–197.
2. Кипение ацетона на горизонтальных трубах с поперечным оребрением в кольцевом канале / А.В. Овсянник, Н.А. Вальченко, Д.А. Дробышевский и др. // Вестник ГГТУ. — 2002. — № 2. — С. 31–37.
3. **Толубинский В. И.** Теплообмен при кипении. — Киев: Наукова думка, 1980. — 316 с.
4. **Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г.** Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. — М.: Высшая школа, 1986. — 448 с.
5. **Исяченко В. П., Осипова В. А., Сукомел.** Теплопередача. — М.: Энергоиздат, 1981. — 416 с.
6. **Данилова Г. Н., Тихонов А. В.** Экспериментальное исследование теплообмена при кипении холодильных агентов на интенсифицированных поверхностях теплообмена // Кипение, кризисы кипения, закризисный теплообмен: Тр. Первой Российской национальной конференции по теплообмену (М., Россия, ноябрь 1994). — М.: Изд-во МЭИ, 1994. — Т. 4. — С. 91–95.

Получена в редакции 10.08.2004 г., принята к печати 20.10.2004 г.