

УДК 536.24

**КИПЕНИЕ АЦЕТОНА НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ  
ТРУБАХ С ПОПЕРЕЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ  
В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ**

**А.В. ОВСЯННИК, Н.А. ВАЛЬЧЕНКО, Д.А. ДРОБЫШЕВСКИЙ,  
М.Н. НОВИКОВ, Е.А. КОРШУНОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Введение**

Актуальность исследований определяется широким распространением ребренных поверхностей в промышленности в связи с их универсальностью для различных теплоносителей, технологичностью изготовления и сборки, возможностью работы на загрязненных теплоносителях. К тому же, до настоящего времени нет достаточных широкомасштабных исследований по процессу кипения жидкостей в условиях «стеснения» (отношение диаметра канала к диаметру образца меньше десяти), что не позволяет выполнять расчеты теплопередающей аппаратуры различных энергоустановок с достаточной точностью.

**1. Экспериментальная установка и методика проведения исследований**

Экспериментальные исследования проводились на специально созданном стенде, показанном на рис. 1. Геометрические параметры канала и исследованных образцов представлены в таблице 1.

*Таблица 1*

**Параметры исследованных образцов**

№ образца	$d_o$ , мм	$D_o$ , мм	$d_{вн}$ , мм	$S_p$ , мм	$\delta_o$ , мм	$\delta_v$ , мм	$L_o$ , мм	$N_p$ , шт.	$h_p$ , мм	$F_o$ , м <sup>2</sup>	$F_n$ , м <sup>2</sup>	$D$ , мм
1	25	-	16	-	-	-	302	-	-	0,0237	0,0237	107
2		-		-	-	-		-				
3		50		4	4	2		36	12,5	0,0124	0,0592	
4				4	2	2		47		0,0163	0,0772	
5				4	4	1		36		0,0124	0,0539	

Здесь:  $d_o$  – диаметр образца по основной поверхности;  $D_o$  – наружный диаметр ребра;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр образца;  $S_p$  – шаг ребра;  $\delta_o$  – толщина основания ребра;  $\delta_v$  – толщина вершины ребра;  $L_o$  – длина образца;  $N_p$  – количество ребер;  $h_p$  – высота ребра;  $F_o$  – площадь основной поверхности;  $F_n$  – полная наружная площадь образца;  $D$  – диаметр кольцевого канала; 1, 2 – полированная и технически шероховатая трубки; 3, 4, 5 – соответственно, параболический, прямоугольный, треугольный профиль ребра.

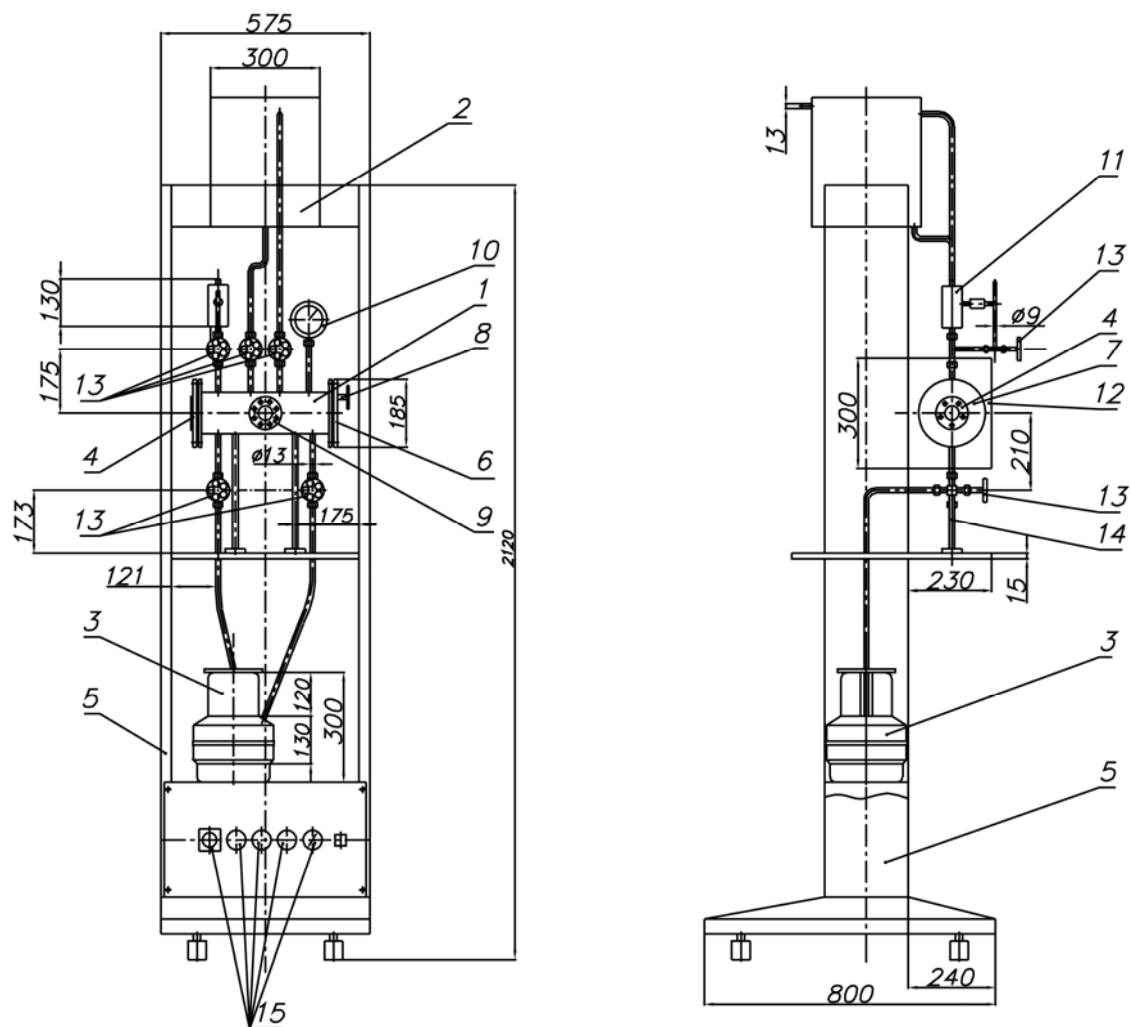


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – рабочая камера; 2 – конденсатор; 3 – баллон с рабочей жидкостью; 4, 9 – иллюминатор; 5 – стойка; 6, 7 – фланцы; 8 – вывод термопар; 10 – манометр; 11 – клапан предохранительный; 12 – защитный экран; 13 – вентиль; 14 – стойка рабочей камеры; 15 – электрические розетки

Тепловой поток к образцу подводился с помощью электронагревателя от стабилизированного источника постоянного тока. Жидкость в процессе проведения эксперимента подавалась через нижний патрубок в кольцевой канал, а паровая фаза отводилась через верхний патрубок в конденсатор. Водяной теплообменник-конденсатор 2 выполнен в виде емкости, в которой установлены два змеевика. Необходимое давление в кольцевом канале обеспечивалось конденсатором, поддерживающим уровень давления за счет изменения расхода охлаждающей жидкости.

Рабочая испарительная камера 1 представляет собой цилиндр, закрытый фланцами 6 и 7. Фланец 7 имеет стеклянный иллюминатор для подсветки фонарем. На фланце 6 смонтирован разъем 8 для подвода термопар. Посреди камеры предусмотрен смотровой иллюминатор 9 для визуального наблюдения процесса кипения на поверхности образца. Для хранения рабочей жидкости служит баллон 3. На рабочей камере установлены: манометр 10, предохранительный клапан 11, вентиль 13 – для подачи в камеру воздуха при проверке на герметичность при замене образца и вывода паров рабочей жидкости (для токсичных). На стойке 5 смонтированы электрические розетки 15: для подачи напряжения, для подсветки, для нагрева рабочего образца. Образцы изготавливались из дюралюминия. На поверхности экспериментальных

образцов для измерения температурного напора зачеканивались хромель-копелевые дифференциальные термопары с диаметром проводников 0,5 мм. Экспериментальные данные регистрировались и обрабатывались с помощью автоматизированной системы измерений, созданной на базе аналого-цифрового преобразователя ADC32-1533 фирмы ANALOG DEVICES, программой обработки данных ADC32GD 1.0.

## 2. Результаты исследования и их обсуждение

В качестве контрольных опытов были проведены эксперименты по кипению ацетона при атмосферном давлении на технически шероховатой и полированной горизонтальных трубках в диапазоне тепловых потоков 6-100 кВт/м<sup>2</sup> (рис. 2). Полученные опытные данные удовлетворительно согласуются с результатами работы [1], и подтверждают положительное влияние условий «стеснения» [2]. Коэффициенты теплоотдачи для исследованных условий проведения опытов, в диапазоне малых и умеренных тепловых потоках (6-40 кВт/м<sup>2</sup>), получены на 10-30 % выше, чем при кипении в большом объеме (рис. 3). Это объясняется тем, что при затрудненном отводе паровой фазы создается дополнительный перепад давления, который способствует уменьшению критического радиуса парового зародыша, и, как следствие, приводит к увеличению количества активных центров парообразования.

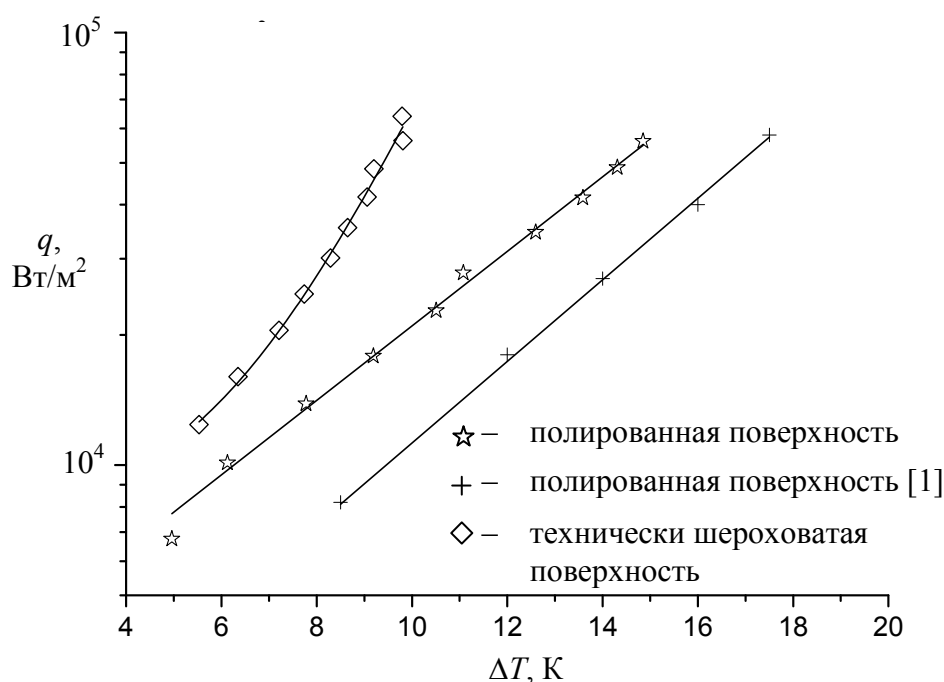


Рис. 2. Экспериментальные зависимости  $\Delta T = f(q)$  при кипении ацетона на гладкой поверхности при атмосферном давлении

Экспериментальное исследование теплообмена при кипении ацетона на попеременно оребренных горизонтальных трубках с различной геометрией ребра проведено в диапазоне тепловых потоков  $q = 3 \div 30$  кВт/м<sup>2</sup> при атмосферном давлении. Исследовались три типа оребренных поверхностей со следующими профилями ребра: прямоугольный, параболический и треугольный. Более низкие значения плотности теплового потока (по сравнению с технически шероховатой и полированной трубками) свя-

заны с тем, что подводимый от электронагревателя тепловой поток относился к полной поверхности оребренной трубки:

$$q = \frac{Q}{F_o + F_p}, \quad (1)$$

где  $F_o$  – площадь основной поверхности без оребрения;  $F_p$  – полная площадь ребер.

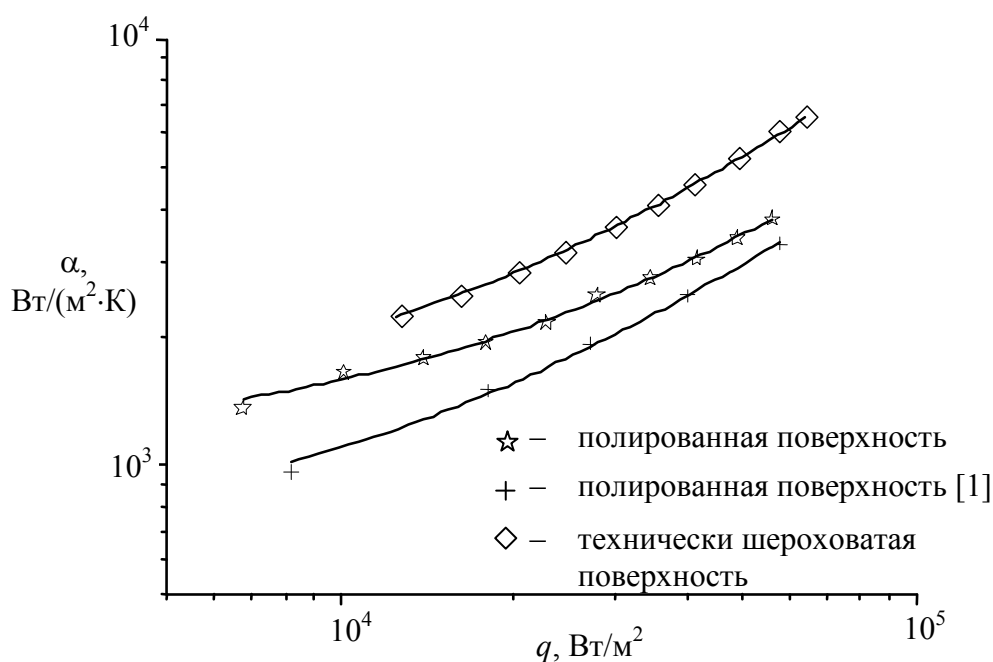


Рис. 3. Экспериментальные зависимости  $\alpha = f(q)$  при кипении ацетона на гладкой поверхности при атмосферном давлении

Коэффициенты теплоотдачи рассчитывались как отношение плотности теплового потока к среднему температурному напору по образцу:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T_{cp}} = \frac{q}{(\Delta T_o + \Delta T_p) / 2}, \quad (2)$$

где  $\Delta T_o$  – средний температурный напор по основной поверхности не занятой оребрением;  $\Delta T_p$  – средний температурный напор по ребру.

По результатам визуальных наблюдений процесса кипения на гладких и оребренных трубках можно отметить, что процесс парообразования (начало кипения) на оребренных поверхностях начинался при значительно более низких температурных напорах и плотностях теплового потока (1 – 2 °С и 5 °С, 3 кВт/м<sup>2</sup> и 6,5 кВт/м<sup>2</sup>, соответственно, см. рис. 4). Это говорит о достаточно высокой эффективности оребренных поверхностей. Средние коэффициенты теплоотдачи для них в 2-3,5 раза выше, чем для полированной трубки (рис. 5).

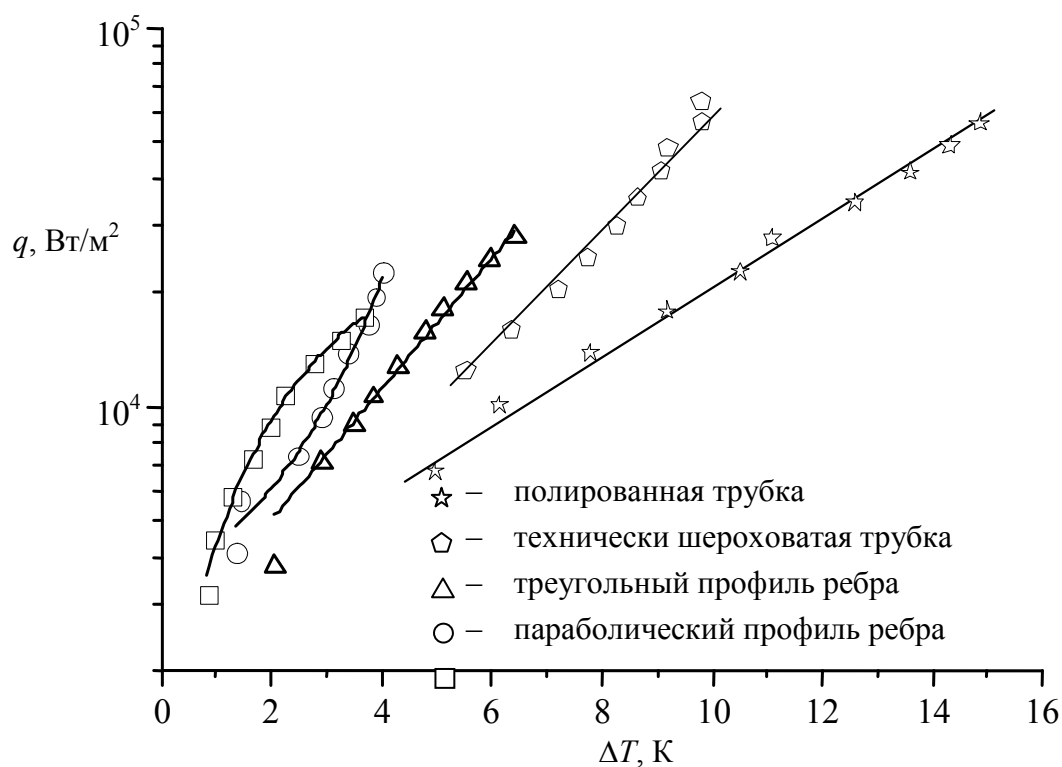


Рис. 4. Экспериментальные зависимости  $\Delta T = f(q)$  при кипении ацетона на трубках с поперечным оребрением при атмосферном давлении

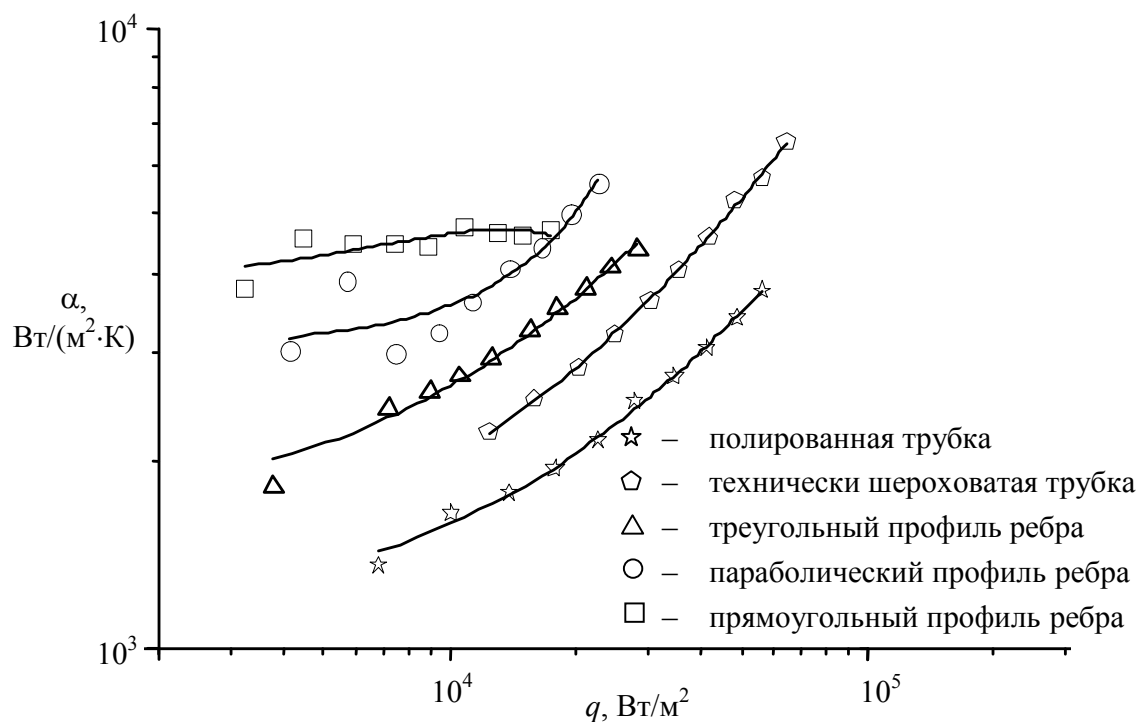


Рис. 5. Экспериментальные зависимости  $\alpha = f(q)$  при кипении ацетона на трубках с поперечным оребрением при атмосферном давлении

В то же время, характер кривых кипения на оребренных трубках в значительной мере определялся геометрией поверхности [3, 4]. При кипении на трубке с прямо-

угольным профилем ребра в области малых тепловых потоков  $3 - 15 \text{ кВт/м}^2$  значения коэффициентов теплоотдачи выше, нежели на поверхности с параболическим профилем ребра. Это связано с ослаблением пульсаций у поверхности окружающей образец жидкости, более быстрым прогреванием объемов жидкости в межреберных зазорах, что приводит к стабилизации процесса парообразования. Однако с ростом теплового потока  $q > 15 \text{ кВт/м}^2$  картина резко меняется. В этом случае достаточно узкое поперечное сечение прямоугольного оребрения препятствует отводу образовавшейся паровой фазы, что приводит к снижению интенсивности теплоотдачи вследствие запаривания поверхности. Процесс кипения на трубке с треугольным оребрением начинался при более высоких температурных напорах и плотностях теплового потока ( $2 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $4 \text{ кВт/м}^2$ ). В этом случае низкая эффективность (более низкие значения коэффициентов теплоотдачи, чем для других исследованных оребренных поверхностей) обусловлена ухудшением условий зарождения паровой фазы – значительным влиянием пульсаций жидкости у поверхности, и снижением количества возможных центров парообразования из-за слабого развития поверхности теплообмена.

### Выводы

1. Экспериментально подтверждено положительное влияние условий «стеснения» на интенсивность теплоотдачи при кипении ацетона на горизонтальных трубках в кольцевом канале.
2. Проведены экспериментальные исследования процесса кипения на трубках с поперечным оребрением. Полученные значения коэффициентов теплоотдачи в 2-3,5 раза превышают аналогичные величины для гладкой поверхности, что говорит о достаточно высокой эффективности исследованного метода интенсификации теплоотдачи.
3. Выявлены закономерности влияния профиля ребра на вид кривой кипения. Определено, что в области малых тепловых потоков ( $3 - 15 \text{ кВт/м}^2$ ) наиболее эффективным является прямоугольное оребрение, а при  $q > 15 \text{ кВт/м}^2$  – параболическое.
4. Полученные результаты могут быть использованы при разработке высокоэффективных теплообменных аппаратов, теплопередающие поверхности которых работают в условиях «стеснения».

### Литература

1. Вершинин С.В., Майданик Ю.Ф. Исследование теплообмена при кипении ацетона на мелкопористой капиллярной структуре. – Свердловск, 1987. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ, № 666–В87.
2. Овсянник А.В. Некоторые особенности кипения жидкостей в горизонтальных кольцевых каналах //Тепломассообмен – ММФ – 2000: Труды 4-го Минского международного форума по тепло- и массообмену. – Минск: АНК ИТМО НАНБ, 2000. – Т. V. – С. 193-197.
3. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.
4. Безродный М.К., Сосновский В.И. Определение оптимальных параметров оребрения поверхности, охлаждаемой кипящей жидкостью //ИФЖ. – 1976. – Т. 31, № 1. – С. 142-143.

Получено 20.05.2002 г.