

УДК 536.24

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ ПРОПАНА НА ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНОЙ ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Л.Л. ВАСИЛЬЕВ, А.С. ЖУРАВЛЕВ

*АНК Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова
НАН Беларуси, Республика Беларусь*

А.В. ОВСЯННИК, М.Н. НОВИКОВ

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

Проведено экспериментальное исследование влияния давления на теплообмен при кипении пропана на образцах с медной спеченной капиллярно-пористой структурой в диапазоне тепловых потоков $q=100\div 64000$ Вт/м² и давлений насыщения $p_n=0,48\div 1,08$ МПа ($T_n=0\div 30^\circ\text{C}$). Выполнен анализ влияния давления на теплообмен при кипении пропана в условиях большого объема в зависимости от плотности теплового потока и характеристик пористой структуры.

Введение

В настоящее время активно ведутся поиски экологически безопасных и нетоксичных теплоносителей способных обеспечивать эффективный теплообмен. Поэтому несомненный интерес для использования представляют углеводороды (пропан, пропилен, бутан, пропан-бутановые смеси), обладающие рядом уникальных свойств и являющиеся альтернативой озоноразрушающим фреонам.

Пропан является диэлектрической жидкостью, химически не активной для большинства конструкционных материалов. Благодаря этим свойствам в сочетании с высокими теплофизическими характеристиками пропан может широко применяться в испарительных теплообменниках погружного типа для охлаждения элементов микроэлектроники, а также в качестве рабочей жидкости в тепловых трубах. Определение особенностей влияния давления на интенсивность теплоотдачи при кипении пропана в большом объеме на пористых покрытиях дает возможность выбора оптимальных эксплуатационных режимов работы теплообменного оборудования.

1. Экспериментальное оборудование

Для исследований теплообмена при кипении сжиженного пропана в АНК ИТМО НАНБ был создан специальный экспериментальный стенд, схема которого и методика проведения экспериментов подробно описаны в [1]. Экспериментальные образцы представляли собой медные горизонтальные трубы $\varnothing 20\times 1.75$ мм и длиной 100 мм, на наружную поверхность которых напекалось пористое покрытие. Пористость образцов была постоянной и составляла $50\div 55$ %. Характеристики исследованных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики исследованных образцов

№	Толщина структуры $\delta_{кс}$, мм	Диаметр частиц d_c , мкм	Средний гидравлический размер пор \bar{d}_0 , мкм
1	0,2	40...63	18,37
2	0,3		
3	0,4		
4	0,5		
5	0,3	63...100	24,48
6	0,4		
7	0,5		
8	0,6		
9	0,8		
10	0,4	100...+160	35,4
11	0,5		

2. Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальное исследование давления насыщения на теплообмен при кипении пропана на образцах со спеченной капиллярно-пористой структурой из медного порошка марки ПМС–Н было проведено в диапазоне тепловых потоков $q=100\div 64000$ Вт/м² и давлений насыщения $p_n=0,48\div 1,08$ МПа ($T_n= 0\div 30^\circ\text{C}$).

Известно, что величина коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости зависит от давления, причем степень влияния давления по-разному проявляется в зависимости от вида теплоотдающей поверхности и теплофизических свойств жидкости. Имеющиеся в литературе опытные данные по кипению различных жидкостей на поверхностях с капиллярно-пористой структурой не дают возможности однозначно определить характер степени влияния давления на теплообмен: в одних работах [2–4] отмечено увеличение степени влияния давления на коэффициент теплоотдачи, результаты других [5–9] говорят о примерном равенстве или снижении этого влияния по сравнению с гладкой поверхностью. Такое качественное различие степени влияния давления можно объяснить: различием областей рабочих давлений; отличием физических свойств теплоносителей; изменением в значительном диапазоне теплопроводности скелета структуры; многообразием используемых типов покрытий и их геометрическими характеристиками. Поэтому, на наш взгляд, более корректным будет представление опытных данных в виде зависимости $\alpha=f(p/p_{кр})$. На основании проведенных экспериментальных исследований был определен показатель степени в соотношении $\alpha=C\cdot(p/p_{кр})^k$ и выявлено влияние на него различных факторов, определяющих интенсивность теплоотдачи при кипении.

Одним из параметров, оказывающих существенное влияние на значения k , является плотность теплового потока. На рис. 1 показана зависимость $k = f(q)$ для различных фракций. Как видно из рисунка, с повышением теплового потока степень влияния давления снижается. По мере возрастания плотности теплового потока (или перегрева теплоотдающей поверхности) кипение начинается во все более мелких порах, ранее заполненных жидкостью. Очевидно, что для каждого давления существует граничный перегрев поверхности $\Delta T_{зр}$, начиная с которого подавляющее количество пор капиллярно-пористой структуры становятся активными. При $\Delta T > \Delta T_{зр}$ ак-

тивизируются поры очень малых размеров, количество которых невелико. Из-за сравнительно небольшого прироста количества центров парообразования увеличение интенсивности теплоотдачи незначительно. Поскольку с увеличением давления значения ΔT_{cp} снижаются (уменьшается критический радиус паровых зародышей), то при малых тепловых потоках влияние давления будет проявляться сильнее по сравнению с большими значениями q . При $\Delta T > \Delta T_{cp}$ достигается примерное равенство активных и возможных центров парообразования, что приводит к слабому или вообще отсутствию влияния давления на теплообмен. Действительно, для большинства исследованных образцов в диапазоне тепловых потоков $q > 15 \div 30$ кВт/м² (в зависимости от геометрических характеристик покрытия) наблюдалась автомодельность коэффициентов теплоотдачи от давления ($k \approx 0$), что соответствует II режиму развитого кипения [1].

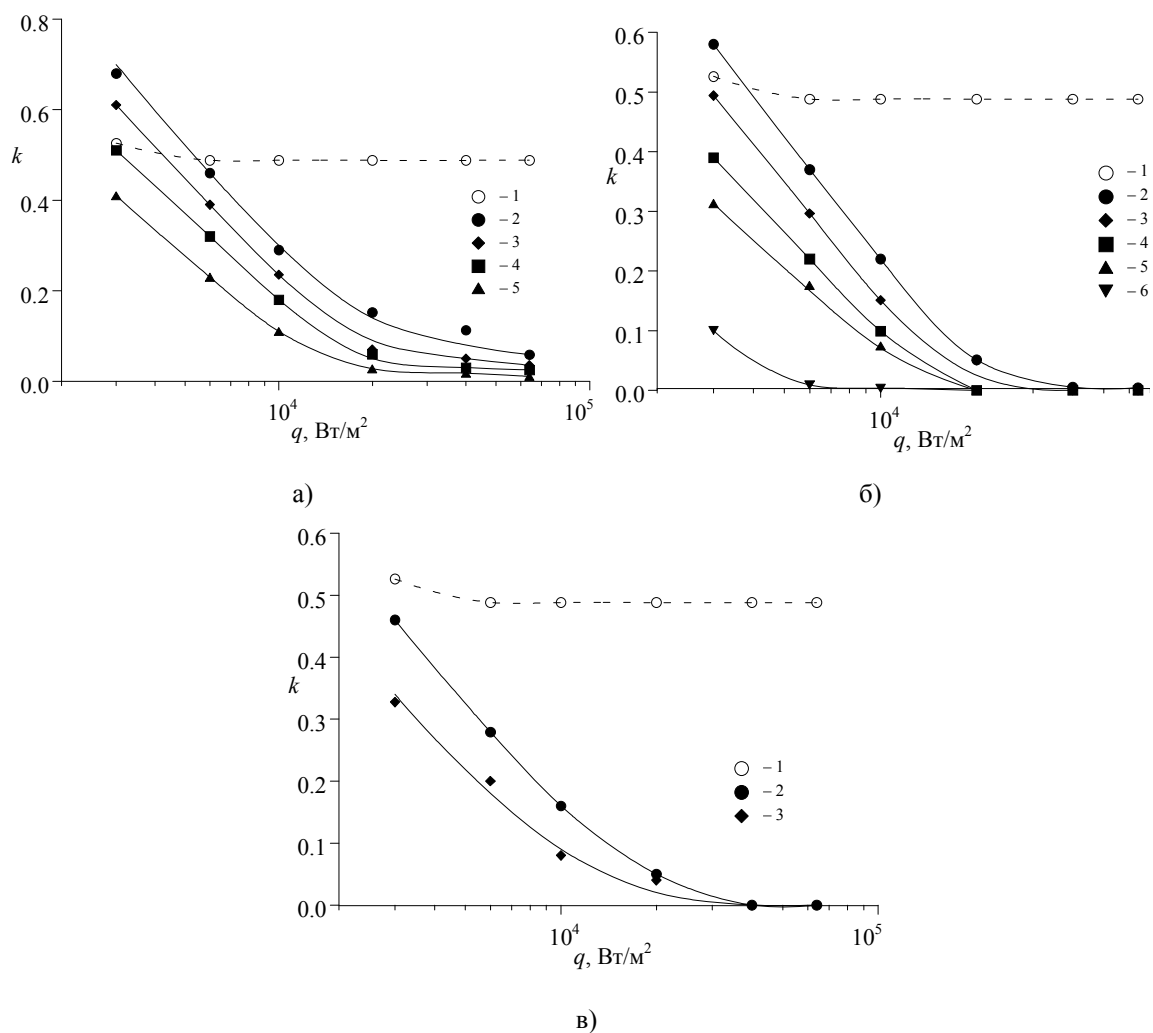


Рис. 1. Зависимость показателя степени k в соотношении $\alpha = C \cdot (p/p_{кр})^k$ от плотности теплового потока q при кипении пропана на поверхности со спеченной капиллярно-пористой структурой для различных фракций: 1 – гладкая поверхность; а) $d_p = 40 \div 63$ мкм, 2÷5 – образцы № 1÷4, соответственно (табл. 1); б) $d_p = 63 \div 100$ мкм, 2÷6 – образцы № 5÷9, соответственно (табл. 1); в) $d_p = 100 \div 160$ мкм, 2÷3 – образцы № 10÷11, соответственно (табл. 1)

Средний гидравлический размер пор \bar{d}_0 , учитывающий влияние таких характеристик пористого покрытия, как пористость и средний размер частиц, составляющих

скелет структуры, оказывал незначительное влияние на значения k (рис. 2). Увеличение размера частиц приводит к большему размаху дифференциальной функции распределения пор по размерам и, как следствие, к увеличению значений \bar{d}_0 . Бóльшим значениям \bar{d}_0 соответствуют бóльшие значения ΔT_{zp} при одинаковой толщине покрытия (при $\bar{d}_0=18,37$ мкм $\Delta T_{zp(\delta=0,5 \text{ мм})}=0,7$ К, а при $\bar{d}_0=48,8$ мкм $\Delta T_{zp(\delta=0,5 \text{ мм})}=1,8$ К; $T_H=20$ °С). В то же время, число пор, приходящееся на единицу поверхности (оцененное по формуле $5 \approx 4\pi/(\pi \cdot \bar{d}_0)$), для образца с $\bar{d}_0=48,8$ мкм почти на порядок ниже ($1,9 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ и $2,67 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$, соответственно). Разница в количестве активных центров парообразования при изменении давления для образца с $\bar{d}_0=18,37$ мкм, следовательно, должна быть больше. Однако влияние этих факторов на показатель степени k взаимно компенсируется. Для образцов, состоящих из частиц мелких фракций, значительное количество пор активно уже при малых тепловых потоках («взрывное вскипание»), и темп активации центров парообразования становится соизмеримым с приростом активных центров на образцах из более крупных фракций. При увеличении плотности теплового потока степень этого влияния с изменением \bar{d}_0 становится еще менее заметной, хотя следует отметить тенденцию к некоторому снижению k с ростом \bar{d}_0 при небольших тепловых потоках.

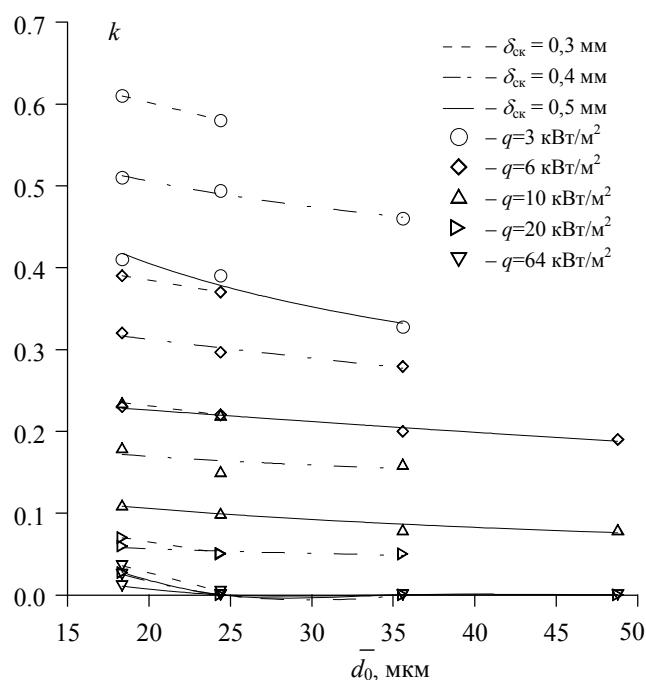


Рис. 2. Зависимость показателя степени k в соотношении $\alpha=C \cdot (p/p_{кр})^k$ от среднего гидравлического размера пор \bar{d}_0 для фиксированных толщин пористого покрытия при различных тепловых потоках

Существенное влияние на показатель степени k в соотношении $\alpha=C \cdot (p/p_{кр})^k$ оказывает толщина пористого покрытия $\delta_{ск}$. Полученная экспериментально зависимость $k=f(\delta_{ск})$ представлена на рис. 3. Как видно из рисунка, увеличение толщины пористого покрытия при небольших тепловых потоках приводит к монотонному снижению показателя степени k . Это связано с тем, что количество парогенерирующих пор не изменяется, а гидравлическое сопротивление с ростом толщины структуры выходящему пару возрастает. Известно, что с ростом теплового потока толщина перегретого пограничного слоя снижается и в определенном диапазоне его значений (до кри-

зиса кипения) не зависит от давления. Поэтому для достаточно больших тепловых потоков (режим II) можно предположить, что увеличение толщины структуры не приводит к дополнительному приросту количества центров парообразования. Вследствие этого наблюдается автомодельность значений k от толщины капиллярно-пористой структуры.

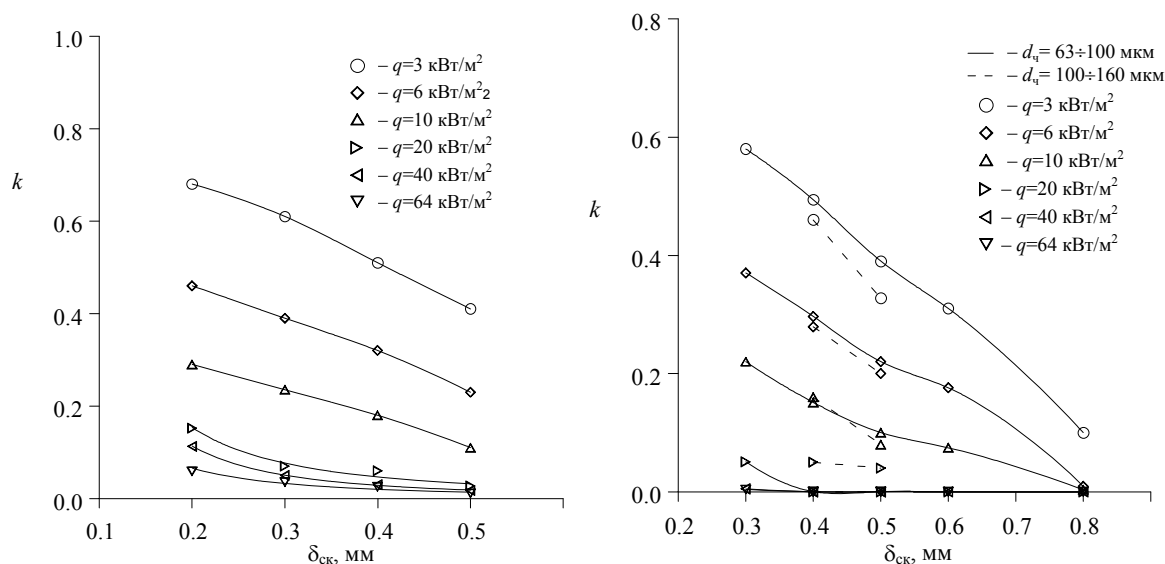


Рис. 3. Зависимость показателя степени k в соотношении $\alpha = C \cdot (p/p_{кр})^k$ от толщины пористого покрытия δ_{ck} при различных плотностях теплового потока для различных фракций: а) $d_i = 40 \div 63$ мкм; б) $d_i = 63 \div 100$ мкм и $d_i = 100 \div 160$ мкм

Как отмечено выше, степень влияния давления определяется темпом активации пор капиллярной структуры. Для структур, имеющих широкий диапазон размеров пор, это влияние проявляется сильнее, поскольку с изменением давления насыщения изменяется и количество активных центров парообразования. Этим можно объяснить более сильное влияние давления по сравнению с гладкой поверхностью на металловолоконистых и напыленных покрытиях. Для высокотеплопроводных медных структур, изготовленных спеканием из частиц одной фракции, количество пор, приходящихся на максимум дифференциальной функции распределения, составляет приблизительно 80 % и лежит в довольно узком интервале значений [1, 7]. При приближении критического диаметра пузырей к эффективному размеру пор наблюдается эффект «взрывного вскипания». В этом случае большинство пор капиллярной структуры являются активными. При таких условиях, в зависимости от фракции, в определенном интервале давлений насыщения его влияние должно ослабевать, что и подтверждают экспериментальные данные нашего исследования.

Выводы

В результате экспериментального исследования были выявлены особенности влияния давления на коэффициент теплоотдачи в зависимости от плотности теплового потока и параметров пористого покрытия для медных спеченных капиллярно-пористых структур:

1. При увеличении плотности теплового потока значение показателя степени k в соотношении $\alpha = C \cdot (p/p_{кр})^k$ уменьшается и достигает практически нулевого значения при переходе ко второму режиму развитого кипения.

2. С ростом толщины пористого покрытия (в исследованном диапазоне значений $\delta_{ск}$) степень влияния давления также снижается.

3. Изменение среднего гидравлического размера пор \bar{d}_0 в исследованном диапазоне оказывает незначительное влияние на показатель степени k в зависимости $\alpha = C \cdot (p/p_{кр})^k$.

4. Степень влияния давления при кипении на пористой поверхности определяется темпом активации центров парообразования, зависящим от типа покрытия и его параметров.

Литература

1. Новиков М.Н. Теплообмен при кипении пропана на горизонтальных трубах со спеченным пористым покрытием // Вестник ГГТУ. – 2000. № 2. – С. 58-66.
2. Орлов В.К., Савельев В.Н. Интенсификация теплообмена при кипении криогенных жидкостей при давлениях ниже атмосферного // Теплоэнергетика. – 1980. – № 4. – С. 62-64.
3. Кузма-Кичта Ю.А., Комендантов А.С., Бурдуниин М.Н. и др. Исследование интенсификации теплосъема в парогенерирующих каналах с пористым покрытием // Теплоэнергетика. – 1991. – № 5. – С. 42-47.
4. Hongji Z., Aihua J. Experimentation of boiling heat transfer from thin powder porous layers at atmospheric and super-atmospheric pressures. // 8-th International Heat Pipe Conference. – Beijing, China, 1992. P. A-11, P. 1-6.
5. Зарипов В.К., Семена М.Г., Шаповал А.А., Левретов А.И. Интенсивность теплообмена при кипении на поверхности с пористыми покрытиями в условиях свободного движения // ИФЖ. – 1989. – Т. 57. – № 2. – С. 181-186.
6. Вершинин С.В., Майданик Ю.Ф. Исследование теплообмена при кипении ацетона на мелкопористой капиллярной структуре // Свердловск, 1987. Деп. в ВИНТИ, № 666-B87, 20 с.
7. Васильев Л.Л., Конев С.В., Штульц П., Хорват Л. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении жидкости в высокотеплопроводных капиллярных структурах // ИФЖ. – 1982. – Т. 42. – № 6. – С. 893-898.
8. Позняк В.Е., Савельев В.Н. Опыт применения капиллярно-пористых покрытий в криогенных системах и установках // Теплоэнергетика. – 1990. – № 12. – С. 9-12.
9. Шаповал А.А., Зарипов В.К., Семена М.Г. К расчетам интенсивности теплообмена при кипении на поверхности с пористыми покрытиями // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1989. – № 3. – С. 63-68.

Получено 22.05.2001 г.