

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ ПРОПАНА НА ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Л.Л. Васильев¹, А.В. Овсянник², М.Н. Новиков², А.С. Журавлев¹

¹АНК Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ,
Беларусь, 220072, Минск, ул. П. Бровки, 15

²Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,
Беларусь, 246746, г. Гомель, пр-т Октября, 48

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование влияния давления на теплообмен при кипении пропана на образцах с медной спеченной капиллярно-пористой структурой в диапазоне тепловых потоков $q=100\div64000$ Вт/м² и давлений насыщения $p_n=0.48\div1.08$ МПа ($T_n=0\div30^\circ\text{C}$). Выполнен анализ влияния давления на теплообмен при кипении пропана в условиях большого объема в зависимости от характеристик пористой структуры.

1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с ухудшающейся экологической обстановкой в странах СНГ и за рубежом в настоящее время активно ведутся поиски экологически безопасных и нетоксичных теплоносителей, способных обеспечивать эффективный теплообмен. Не последнюю роль играет и химическая совместимость с конструкционными материалами, применяющимися в теплообменном оборудовании. Поэтому несомненный интерес для использования представляют углеводороды (пропан, пропилен, бутан, пропан-бутановые смеси), обладающие рядом уникальных свойств и являющиеся альтернативой озоноразрушающим фреонам.

В опубликованных по данной теме работах сведений по кипению пропана сравнительно немного и они носят ограниченный характер. В основном, описаны результаты исследований процесса кипения при какой-либо одной величине давления [1–3]. В связи с этим интерес представляет исследование влияния давления на коэффициент теплоотдачи, в зависимости от плотности теплового потока и геометрических характеристик пористого покрытия.

2. 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 [4]. Экспериментальные образцы представляли собой медные горизонтальные трубы $\varnothing 20 \times 1.75$ мм и длиной 100 мм, на наружную поверхность которых напекалось пористое покрытие.

При значительных плотностях подводимого к поверхности теплового потока, когда развивается пузырьковое кипение в объеме пористого покрытия, становится существенным влияние порораспределения капиллярных структур. С целью повышения точности определения параметров процесса теплообмена при кипении рабочей жидкости были исследованы свойства пористых материалов. Пористость образцов была постоянной и составляла $50\div55\%$. Характеристики исследованных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики исследованных образцов

№	$\delta_{\text{кс}}$, мм	$d_{\text{ч}}$, мкм	\bar{d}_0 , мкм
1	0.2	-63...+40	18.37
2	0.3		
3	0.4		
4	0.5		
5	0.3	-100...+63	24.48
6	0.4		
7	0.5		
8	0.6		
9	0.8	-160...+100	35.4
10	0.4		
11	0.5		

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

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 $q=100\div64000$ Вт/м² и давлений насыщения $p_n=0.48\div1.08$ МПа ($T_n=0\div30^\circ\text{C}$). 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 влияния давления на теплообмен. В одних работах [5–7] отмечено увеличение степени влияния давления на коэффициент теплоотдачи, результаты других [8–12] говорят о примерном равенстве или снижении этого влияния по сравнению с гладкой поверхностью. Такое качественное различие влияния давления можно объяснить: различием областей рабо-

чих 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 $\alpha=C(p/p_{кр})^k$ 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 $\Delta T_{гр}$, начиная с которого подавляющее количество пор капиллярно-пористой структуры становятся активными. При $\Delta T > \Delta T_{гр}$ активизируются поры очень малых размеров, количество которых невелико. Из-за сравнительно небольшого прироста количества центров парообразования увеличение интенсивности теплоотдачи незначительно. Поскольку с увеличением давления значения $\Delta T_{гр}$ снижаются (уменьшается критический радиус паровых зародышей), то при малых тепловых потоках влияние давления будет проявляться сильнее по сравнению с большими значениями q . При $\Delta T > \Delta T_{гр}$ 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 [4].

Средний гидравлический размер пор \bar{d}_0 , учитывающий влияние таких характеристик пористой структуры 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 . Большим значениям \bar{d}_0 соответствуют большие значения $\Delta T_{гр}$ при одинаковой толщине покрытия (при $\bar{d}_0=18.37$ мкм $\Delta T_{гр}(\delta=0.5 \text{ мм})=0.7$ К, а при $\bar{d}_0=48.8$ мкм $\Delta T_{гр}(\delta=0.5 \text{ мм})=1.8$ К; $T_n=20$ °С). В то же время число пор, приходящееся на единицу поверхности (оцененное по формуле $n_F \approx 4\pi/(\pi \cdot \bar{d}_0)$), 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

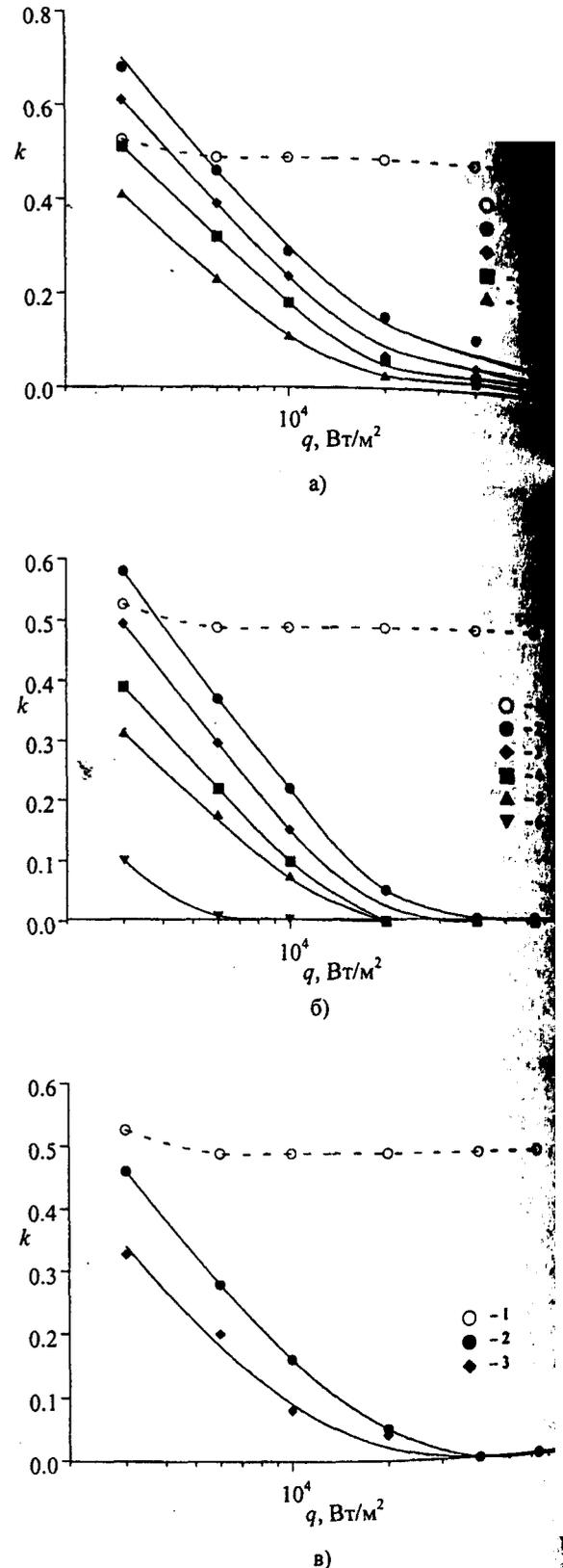


Рис.1. Зависимость показателя степени k в соотношении $\alpha=C(p/p_{кр})^k$ от плотности теплового потока q при кипении пропана на поверхности со спеченной капиллярно-пористой структурой для различных фракций: 1 – гладкая поверхность; а – $d_0=40 \div 63$ мкм, 2÷5 – образцы № 1÷4 соответственно (табл.1); б – $d_0=63 \div 100$ мкм, 2÷6 – образцы № 5÷9 соответственно (табл.1); в – $d_0=100 \div 160$ мкм, 2÷3 – образцы № 10÷12 соответственно (табл.1)

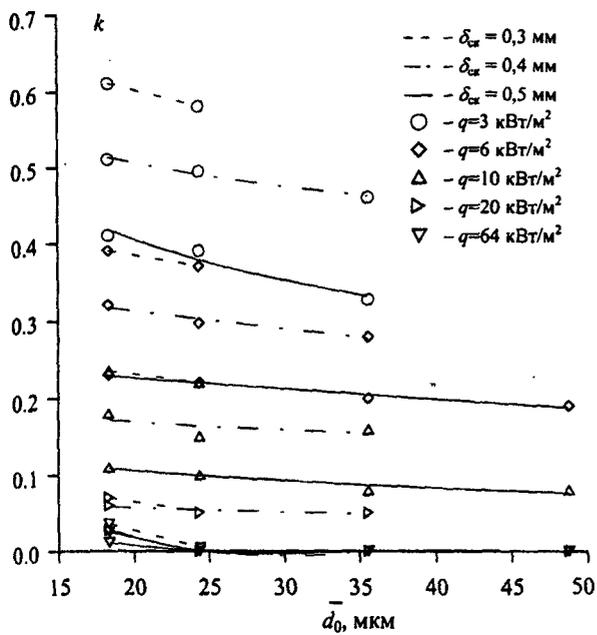


Рис.2. Зависимость показателя степени k в соотношении $\alpha = C(p/p_{\text{кр}})^k$ от среднего гидравлического размера пор d_0 для фиксированных толщин пористого покрытия при различных тепловых потоках

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 d_0 становится еще менее заметной, хотя следует отметить тенденцию к некоторому снижению k с ростом d_0 при небольших тепловых потоках.

Существенное влияние на показатель степени k в соотношении $\alpha = C(p/p_{\text{кр}})^k$ оказывает толщина пористого покрытия $\delta_{\text{ск}}$. Полученная экспериментально зависимость $k = f(\delta_{\text{ск}})$ 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 кризиса 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.

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

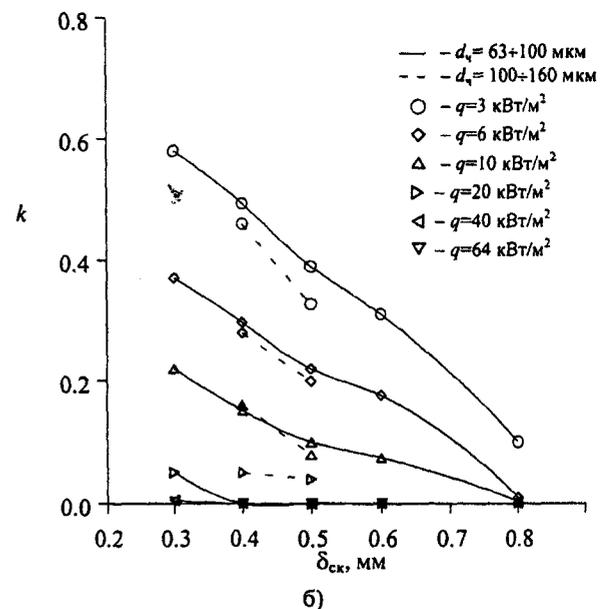
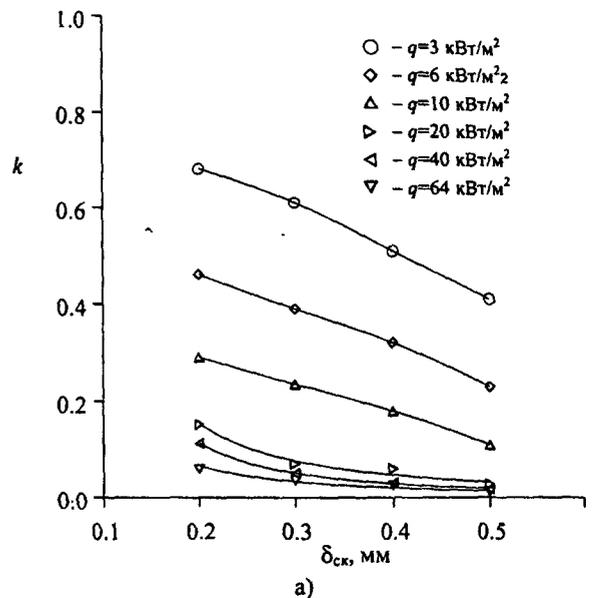


Рис.3. Зависимость показателя степени k в соотношении $\alpha = C(p/p_{\text{кр}})^k$ от толщины пористого покрытия $\delta_{\text{ск}}$ при различных плотностях теплового потока для различных фракций: а- $d_4 = 40+63 \text{ мкм}$; б- $d_4 = 63+100 \text{ мкм}$ и $d_4 = 100+160 \text{ мкм}$.

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 [4,10]. 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 $\alpha=C(p/p_{кр})^k$ уменьшается и достигает практически нулевого значения при переходе ко второму режиму развития кипения.

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

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

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

АНК ИТМО НАНБ — сокращенное название Академического научного комплекса ИТМО НАНБ;

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

q — плотность теплового потока, Вт/м²;

T — температура, град;

$\Delta T = T_c - T_n$ — температурный напор, град;

p — давление, Н/м²;

k — показатель степени в соотношении $\alpha=C(p/p_{кр})^k$;

$\delta_{ск}$ — толщина скелета пористой структуры, мм;

$d_{ч}$ — диаметр частиц, мкм;

\bar{d}_0 — средний гидравлический размер пор, мкм.

Индексы:

n — условия насыщения;

c — стенка;

$кр$ — критическое значение;

$гр$ — граничный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двойрис А.Д., Сиротин А.Г., Сахарова Г.П. Интенсификация процессов сжижения природного газа // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1980. № 4. С. 145-151.

SUMMARY

L.L. Vasiliev, A.S. Zhuravlyov (The Academic Scientific Complex "A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute" of The Academy of Sciences of Belarus, Belarus, 220072, Minsk, P. Brovka str. 15), A.V. Ovsyannik, M.N. Novikov (Gomel State Technical University P.O. Sukhoy, Belarus, 246746, Gomel, av. Octybrya 48),

THE PRESSURE INFLUENCE ON HEAT TRANSFER INTENSITY AT PROPANE BOILING ON POROUS SURFACE

The pressure influence on heat transfer at propane boiling on samples with sintered copper powder capillary-porous structure was investigated. The experiments were carried out at heat fluxes $q = 100-64000$ W/m² and saturation pressure range $p_s = 0.48-1.08$ MPa ($T_s = 0-30$ °C). The analysis of pressure influence on propane pool boiling heat transfer depending on porous structure characteristics was accomplished.

2. Pool boiling heat transfer from GEWA-T-x finned tube pane and propylene / D.Gorenflo, P.Blein, W.Rott et al. Eurotherm № 8. Advanced in Pool Boiling Heat Transfer Proc. of Int. Seminar, Paderborn, F.R.G., 1989. P. 116-120.
3. Gorenflo D., Sokol P., Caplanis S. Pool boiling heat transfer from single plain tubes to various hydrocarbons. // Refrig. 1990. №13. P. 286-292.
4. Новиков М.Н. Теплообмен при кипении пропана на горизонтальных трубах со спеченным пористым покрытием // Вестник ГГТУ. 2000. №2. С. 58 - 66.
5. Орлов В.К., Савельев В.Н. Интенсификация теплообмена при кипении криогенных жидкостей при давлениях ниже атмосферного // Теплоэнергетика. 1980. № 4. С. 62 - 64.
6. Исследование интенсификации теплосъема в парогенерирующих каналах с пористым покрытием / Ю.А. Кузнецов, Кичта, А.С. Комендантов, М.Н. Бурдуни и др. // Теплоэнергетика. 1991. № 5. С. 42-47.
7. 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.
8. Интенсивность теплообмена при кипении на поверхности с пористыми покрытиями в условиях свободного движения / В.К. Зарипов, М.Г. Семена, А.А. Шаповал, А.И. Левретов // ИФЖ. 1989. Т.57. № 2. С. 181-186.
9. Вершинин С.В., Майданик Ю.Ф. Исследование теплообмена при кипении ацетона на мелкопористой капиллярной структуре // Свердловск, 1987. Деп. в ВИНТИ, №666-В87, 20 с.
10. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении жидкости в высокотеплопроводных капиллярных структурах / Л.Л. Васильев, С.В. Конев, П. Штульц, Л. Хорват // ИФЖ. 1982. Т.42, № 6. С. 893 - 898.
11. Позняк В.Е., Савельев В.Н. Опыт применения капиллярно-пористых покрытий в криогенных системах и установках // Теплоэнергетика. 1990. № 12. С. 9 - 12.
12. 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.