

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ПРОПАНА

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 параметров покрытия на теплообмен при кипении пропана на образцах со спеченной капиллярно-пористой структурой из медного порошка марки ПМС-Н 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 детальный анализ влияния геометрических характеристик пористого покрытия на теплообмен при кипении пропана в условиях большого объема.

1. ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Монреальским Протоколом (1993 г.) предусматривается снижение производства и использования озоноразрушающих теплоносителей. В связи с этим в последние годы возрос интерес к изучению теплообмена при кипении углеводородов (пропан, бутан и др.), являющихся альтернативой фреонам в холодильной технике. Количество работ, посвященных кипению углеводородов на поверхностях с пористыми покрытиями, незначительно, поэтому исследования по теплообмену и оптимизации структуры пористого покрытия при кипении углеводородов представляют несомненный интерес и являются актуальными.

Несмотря на большое количество опубликованных работ по кипению на поверхностях с пористыми покрытиями, интерпретация и практическое использование экспериментальных данных затруднено отсутствием полной информации о свойствах покрытий. В связи с этим возникает необходимость в детальном исследовании теплообмена при кипении на поверхностях с пористыми покрытиями, с одновременным измерением их характеристик.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для исследований теплообмена при кипении сжиженно-го 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.

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 в настоящей работе были проведены исследования свойств пористых материалов. Пористость образцов была постоянной и составляла $50\div 55\%$. Характеристики исследованных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики исследованных образцов

| № | $\delta_{кс}$, мм | $d_ч$, мкм | \bar{d}_0 , мкм | $k\cdot 10^{11}$, м ² |
|----|--------------------|-------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0.05-0.06 | -63...+40 | 18.37 | 0.48 |
| 2 | 0.2 | | | |
| 3 | 0.3 ^э | | | |
| 4 | 0.4 | | | |
| 5 | 0.5 | | | |
| 6 | 0.3 | -100...+63 | 24.48 | 0.802 |
| 7 | 0.4 | | | |
| 8 | 0.5 | | | |
| 9 | 0.6 | | | |
| 10 | 0.8 | -160...+100 | 35.4 | 1.553 |
| 11 | 0.4 | | | |
| 12 | 0.5 | | | |
| 13 | 0.5 | -200...+160 | 48.8 | 2.758 |

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальное исследование влияния параметров покрытия 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 ($T_n=0\div 30^\circ\text{C}$).

На основании визуальных наблюдений протекания процесса и измерения величин перегрева теплоотдающей поверхности экспериментальные кривые кипения можно разделить на три области: конвективную, переходную (возможно неразвитое кипение) и собственно развитое кипение.

Нанесение пористого покрытия приводило к стабилизации процесса кипения, и переходная область для большинства исследованных образцов практически отсутствовала. Однако для структур, состоящих из крупных частиц, с размером пор, значительно превы-

шающим критический диаметр парового зародыша, переходная область имела место (рис.1.в, кривая 3). При очень малой толщине пористого покрытия также наблюдалось затягивание начала развитого кипения (рис.1.а, кривая 1). Для капиллярно-пористых структур с $d_{\text{к}}=40\div 63$ (при $T_{\text{н}}=0\div 30^{\circ}\text{C}$), $d_{\text{к}}=63\div 100$ (при $T_{\text{н}}=0\div 20^{\circ}\text{C}$), $d_{\text{к}}=100\div 160$ (при $T_{\text{н}}=0\div 20^{\circ}\text{C}$) при соотношении $\delta_{\text{ск}}/\bar{d}_0 \geq 10$ наблюдалось "взрывное вскипание" (одновременная активация значительного количества центров парообразования) по всей поверхности образца. Во всех остальных случаях кипение начиналось на верхней образующей трубы. Это согласуется с результатами работы [2], авторы которой также наблюдали эффект взрывного вскипания на поверхности High Flux, характеристики которой схожи с исследованными экспериментальными образцами.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ кривых кипения на образцах с пористым покрытием (рис.1.а – 1.в) показал, что область развитого пузырькового кипения можно разделить на два участка. Переход от режима I к режиму II определялся по характерному "излому" кривой кипения. В режиме I генерация пара происходит в непосредственной близости к поверхности нагрева в отдельных центрах парообразования. Зоны генерации пара не связаны между собой по поровому пространству, и интенсивность теплоотдачи определяется количеством активных центров парообразования. Коэффициенты теплоотдачи $\alpha = q/\Delta T_{\text{с}}$ в 4–10 раз выше, чем соответствующие значения α при кипении на гладкой поверхности. При втором режиме ухудшение теплоотдачи связано с тем, что область генерации пара отделена от поверхности нагрева стабилизированной пленкой пара, расположенной внутри пористой структуры (по мнению авторов [3–4]), либо за счет снижения темпа активации центров парообразования (данные работ [5–6]). Значения коэффициентов теплоотдачи незначительно выше соответствующих значений α при кипении на гладкой поверхности.

Анализируя опытные данные настоящего исследования, можно прийти к выводу, что определяющее влияние на интенсивность теплоотдачи имеет темп активации пор и плотность центров парообразования, а возникновение стабилизированной пленки пара возможно при относительно большой толщине покрытия. Например, для образца с $d_{\text{к}}=40\div 63$ мкм и $\delta_{\text{ск}}=0.2$ мм перегиб кривой незначителен, а для структуры с $d_{\text{к}}=63\div 100$ мкм и $\delta_{\text{ск}}=0.3$ мм он ярко выражен, так как количество пор, приходящихся на максимум функции распределения пор и отвечающим оптимальным условиям для возникновения центров парообразования, во втором случае почти в полтора раза меньше [1]. Причем эффективность этих образцов при I режиме кипения практически одинакова, а различие между коэффициентами теплоотдачи при II режиме с ростом теплового потока становится существенным. Для образцов с большой толщиной покрытия $d_{\text{к}}=40\div 63$ мкм и $\delta_{\text{ск}}=0.4\div 0.5$ мм излом кривой кипения становится более заметен, но это связано, по-видимому, с ухудшением условий отвода пара, когда образование стабилизированной паровой пленки становится возможным. Для образца с $d_{\text{к}}=160\div 200$ мкм и $\delta_{\text{ск}}=0.5$ мм перегиб кривой

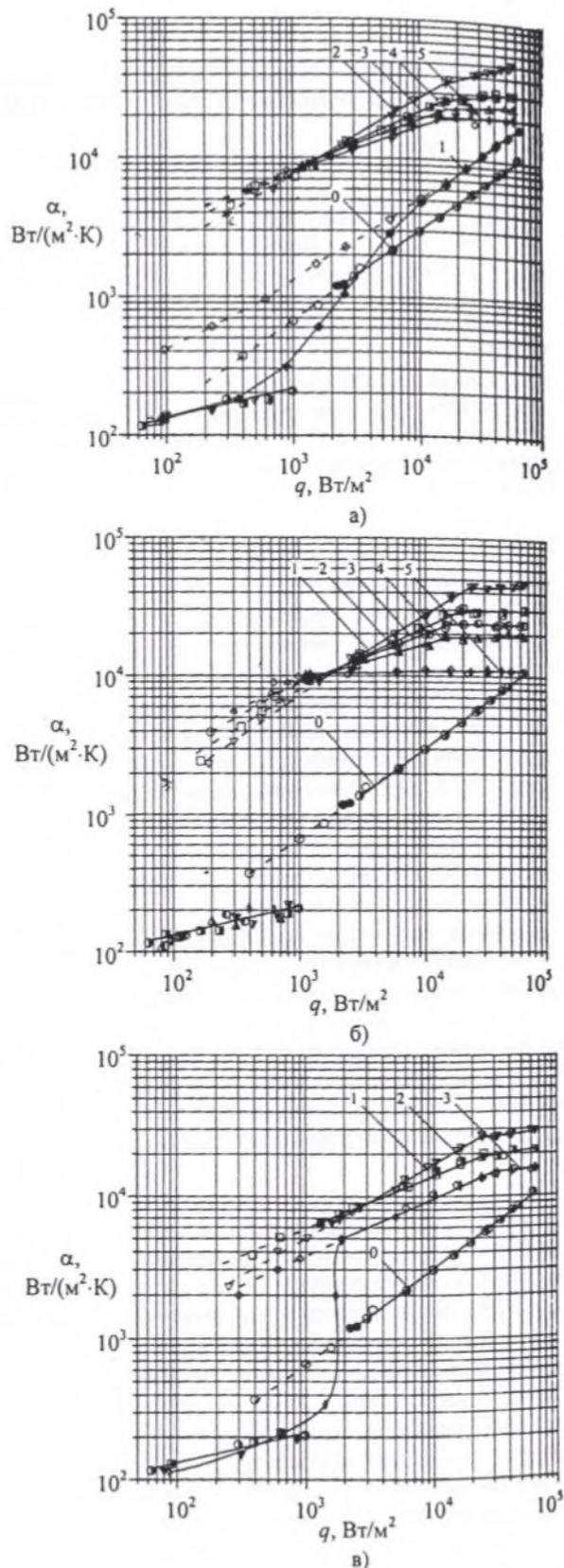


Рис.1. Экспериментальные зависимости $\alpha=f(q)$ при кипении пропана на поверхности со сменным пористым покрытием для различных фракций при $T_{\text{н}}=20^{\circ}\text{C}$: а- $d_{\text{к}}=40\div 63$ мкм, 1–5 – образцы № 1–5 соответственно (табл.1); б- $d_{\text{к}}=63\div 100$ мкм, 1–5 – образцы № 6–10 соответственно (табл.1); в- $d_{\text{к}}=100\div 160$ мкм и $d_{\text{к}}=160\div 200$ мкм, 1–3 – образцы № 11–13 соответственно (табл.1), 0 – гладкая поверхность; темные символы – начало кипения; светлые символы – при снижении теплового потока

также незначителен, но теплоотдающая способность в 2–3.5 раза ниже, чем у образцов №2 и №6 (табл.1). Следовательно, в данном случае улучшение условий отвода пара вместе с уменьшением количества пор не приводило к увеличению коэффициентов теплоотдачи.

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных можно определить влияние геометрических характеристик пористой структуры на интенсивность теплообмена при кипении.

Одним из определяющих параметров капиллярной структуры является средний гидравлический размер пор \bar{d}_0 . Он определяется функцией распределения пор по размерам, зависящей от типа пористого покрытия, размера частиц и пористости. Так как в настоящем исследовании значение пористости покрытия оставалось постоянным и равным 50÷55%, а структуры состояли из частиц определенных фракций, то вместо среднего размера пор для представления результатов использовался средний размер частиц как более удобный. В исследованном диапазоне фракций наблюдалась немонотонная зависимость коэффициентов теплоотдачи от среднего диаметра частиц $\langle d_p \rangle$ (рис.2). Это позволяет объяснить результаты ряда авторов [2-7], которые свидетельствуют как о росте, так и об уменьшении коэффициентов теплоотдачи с уменьшением диаметра частиц.

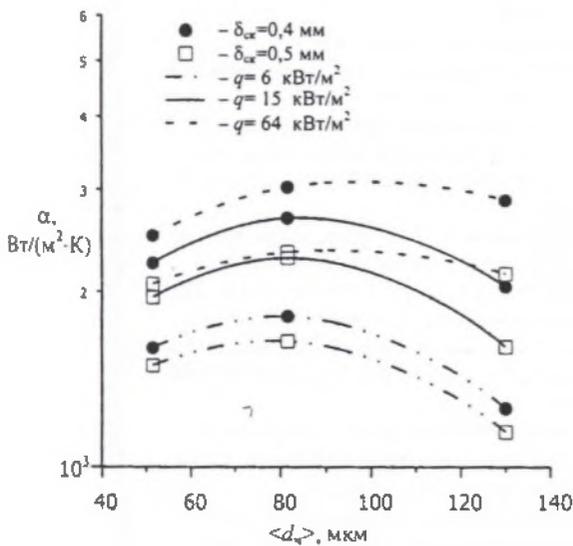


Рис.2. Влияние среднего диаметра частиц на интенсивность теплоотдачи при различных тепловых потоках, ($T_n=20^\circ\text{C}$)

В нашем исследовании увеличение диаметра частиц, больше определенного значения ($d_p > 100$ мкм) неблагоприятно влияло на теплообмен, что объясняется уменьшением количества центров парообразования, нарушением условий термодинамического и механического равновесия паровых зародышей. Уменьшение диаметра частиц ($d_p < 63$ мкм) также снижало интенсивность теплоотдачи, что вызвано ухудшением условий отвода паровой фазы, которые определяются физическими свойствами жидкости и капиллярными характеристиками пористого покрытия.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили вывод большинства авторов, исследовавших теплообмен при кипении на пористых покрытиях, о

значительном влиянии толщины пористого слоя на интенсивность теплоотдачи. Для спеченных капиллярно-пористых структур, состоящих из частиц мелких фракций, главным фактором, определяющим форму кривой кипения и интенсивность теплообмена, является изменение гидравлического сопротивления фильтрации пара от зоны испарения к внешней границе покрытия. Для таких покрытий коэффициент теплоотдачи в зависимости от толщины имеет ярко выраженный максимум при фиксированном значении теплового потока (рис.3).

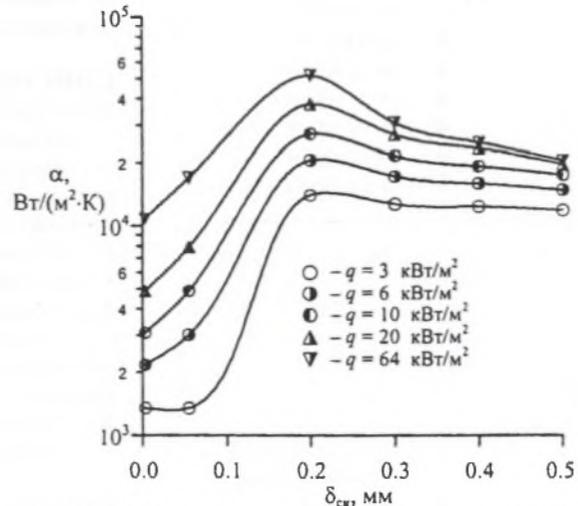


Рис.3. Зависимость $\alpha=f(\delta_{ср})$ при различных тепловых потоках для фракции с $d_p=40\div63$ мкм, $T_n=20^\circ\text{C}$

На основании опытных данных проведенного исследования можно сделать вывод, что зависимость перегрева начала кипения и интенсивность теплоотдачи от толщины капиллярно-пористого покрытия и среднего гидравлического размера пор (в общем случае) или среднего размера частиц (в частности) носит неоднозначный характер. Влияние этих параметров тесно взаимосвязано – изменение толщины структуры $\delta_{ср}$ влечет за собой изменение влияния $\langle d_p \rangle$ и наоборот.

Экспериментальные данные, в этом случае, удобнее представлять в зависимости не от толщины пористого покрытия, а от соотношения толщины и среднего гидравлического размера пор $\delta_{ср}/\bar{d}_0$. Такая зависимость представляется более наглядной, что позволяет выявить совместное влияние характеристик пористой структуры и сделать обобщающие выводы (рис.4).

В области малых толщин $\delta_{ср}/\bar{d}_0 < 11$ выход пара из тела покрытия осуществлялся практически свободно и α увеличивался с ростом $\delta_{ср}$ в связи с формированием более разветвленной системы мелких пор, обеспечивающих подачу жидкости к поверхности нагрева за счет капиллярных сил. При $\delta_{ср}/\bar{d}_0=11\div12.5$ коэффициент теплоотдачи достигал максимальных значений. Дальнейший рост толщины покрытия $\delta_{ср}/\bar{d}_0 > 12.5$ при плотностях теплового потока меньше переходного значения q^* (первый режим развитого кипения) приводил к уменьшению значений α в связи с ростом гидравлического сопротивления фильтрации пара.

Следовательно, можно говорить о строгой зависимости интенсивности теплоотдачи от безразмерного соотношения $\delta_{ср}/\bar{d}_0$, учитывающего практически все характеристики пористой структуры данного типа.

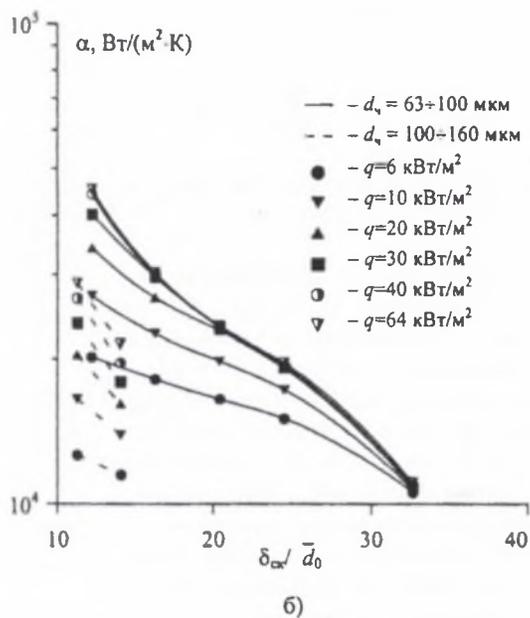
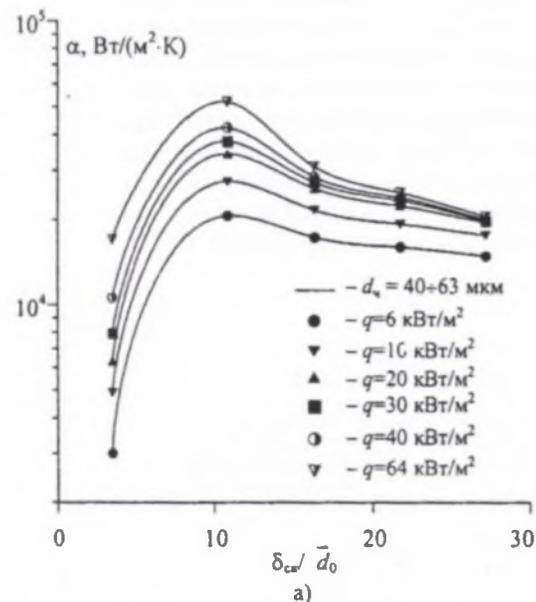


Рис.4. Зависимость $\alpha=f(\delta_{ск}/\bar{d}_0)$ для различных тепловых потоков и фракций: а- $d_4=40\div 63$ мкм; б- $d_4=63\div 100$ мкм, $d_4=100\div 160$ мкм; $T_n=20^\circ\text{C}$

ВЫВОДЫ

Опытные данные настоящего исследования, подтвердили эффективность применения напеченных капиллярно-пористых покрытий. Интенсификация процесса теплообмена наблюдалась во всем диапазоне тепловых нагрузок. Тепловые потоки начала кипения

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. Ostrybrya 48),

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CAPILLARY-POROUS COATING CHARACTERISTICS INFLUENCE ON PROPANE BOILING HEAT TRANSFER.

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

для образцов с оптимальными параметрами покрытия были ниже в 2–2.5 раза, а увеличение коэффициента теплоотдачи достигало 10-кратного по сравнению с гладкой поверхностью.

На основании полученных опытных данных можно сделать вывод о строгой зависимости интенсивности теплоотдачи от соотношения $\delta_{ск}/\bar{d}_0$ в исследованном диапазоне геометрических характеристик данного типа капиллярно-пористых структур, что важно для эффективного их использования.

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;

p — давление, Н/м²;

k — капиллярная проницаемость, м²;

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

d_4 — диаметр частиц, мкм;

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

Индексы:

н — условия насыщения;

с — стенка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новиков М.Н. Теплообмен при кипении пропана на горизонтальных трубах со спеченным пористым покрытием // Вестник ГГТУ. 2000. №2. С. 58 – 66.
- Марто П., Лепер Л. Теплоотдача от структурированной поверхности при кипении диэлектрической жидкости в большом объеме // Теплопередача. 1982. Т.104. №2. С.72 – 80.
- Андреанов А.Б., Малышенко С.П. Влияние характеристик пористых покрытий на теплообмен при кипении // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1989. №1. С.139–149.
- Исследование процессов кипения на пористых поверхностях / Стырикович М.А., Малышенко С.П., Андреанов А.Б. и др. // Теплообмен VII. Т.6. Минск: ИТМО АН БССР. 1984. С. 3–8.
- Семена. М.Г., Гершуни А.Н., Зарипов В.К. Тепловые трубы с металловолоконными капиллярными структурами. Киев: Вища шк., 1984. 216 с.
- Нишик А.П. Предельные режимы тепловых труб с металловолоконными капиллярными структурами: Дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1985. 303 с.
- Теплообмен при кипении азота и фреона-113 на пористых металлических покрытиях / Ройзен Л.И., Рачицкий Д.Г., Рубин И.Р. и др. // ТВТ. 1982. Т.20. №2. С.304–310.