

УДК 536.24

А. В. Овсянник

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

АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ НА ИНТЕНСИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Рассмотрены результаты экспериментального исследования процессов теплообмена при кипении пропана, R11 и R113 на капиллярно-пористых напеченных поверхностях (КПП) при различных геометрических характеристиках структуры (толщина слоя, размер частиц, средний гидравлический размер пор) в диапазоне плотностей тепловых потоков $1 \div 64 \text{ кВт/м}^2$; диапазон давлений насыщения составлял $0,48 \div 1,08 \text{ МПа}$. Проведен анализ рассмотренных процессов и сравнение с интенсивностью теплоотдачи при кипении пропана и пропилена на структурированных поверхностях в диапазоне плотностей тепловых потоков $10 \div 80 \text{ кВт/м}^2$. Рассмотрены различные условия протекания процесса теплообмена на кривой кипения при развитом пузырьковом режиме.

Ключевые слова: Кипение — Теплообмен — Структура — Теплоотдача — Поверхность.

The results of the experimental study of heat transfer processes while boiling of propane, R11 and R113 on the capillary – porous baked up surfaces with different geometry of structural characteristics (layer thickness, size of particles, average hydraulic size of pores) within $1 \div 64 \text{ kW/m}^2$ range of heat flow densities, the range of saturation pressures being within $0,48 \div 1,08 \text{ MPa}$, are considered in the paper. The intensities of the processes under consideration and the heat transfer processes while boiling of propane and propylene on the structured surfaces within the $10 \div 80 \text{ kW/m}^2$ range of heat flow densities were compared and analyzed. Various conditions of the heat transfer process under developed bubble regime on the boiling curve were studied.

Keywords: Boiling – Heat exchange – Structure – Heat transfer – Surface.

I. ВВЕДЕНИЕ

Теплообменные аппараты испарительного типа широко применяются в энергетике, химической, нефтеперерабатывающей, пищевой промышленности, в холодильной и криогенной технике, в теплонасосных установках. В связи с дефицитом энергоресурсов в Республике все большее внимание привлекают теплонасосные установки.

Применение тепловых насосов для целей отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования приводит к существенному снижению потребления топливно-энергетических ресурсов и при этом значительно сокращается количество вредных выбросов в окружающую среду. Присоединение Республики Беларусь к Киотскому протоколу накладывает на страну определенные ограничения по выбросам, и использование тепловых насосов как источника тепловой энергии может частично решить эту проблему. Таким образом, применение тепловых насосов решает, по крайней мере, две крупные задачи:

- снижение потребления топливно-энергетических ресурсов;
- снижение количества вредных выбросов в окружающую среду.

Эффективность работы теплонасосных установок (ТНУ) в значительной мере определяется энергетической эффективностью испарителя, которая зависит от температуры низкопотенциального источника теплоты. Повышение температуры низкопотенциального источника приводит к увеличению количества теплоты, подводимой в цикле ТНУ на нижнем температурном уровне, повышению коэффициента преобразования (КОП) и снижению затраченной мощности на привод компрессора в пароконденсационных ТНУ или снижению затраченной теплоты в сорбционных ТНУ при неизменных параметрах рабочего тела в конденсаторе. Поэтому снижение температурных напоров в испарителях, их массогабаритных показателей и тепловых потерь является одной из важных задач, ведущих к удешевлению ТНУ и повышению их энергетических показателей.

Все эти предпосылки в полной мере относятся и к холодильным установкам.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Развитие поверхности достигается различными способами, в частности, созданием капиллярно-пористой структуры и поверхности с регулярной геометрией (например, Thermoexcel – E и

Turbo – В).

Применение высокоэффективных методов интенсификации теплообмена в аппаратах испарительного типа приводит к созданию теплообменников с малыми тепловыми потерями в связи с уменьшением температурных напоров, что ведет к повышению не только экономических показателей, но и энергетических. Интенсификация теплообмена при кипении позволяет за счет снижения температурных напоров между теплоотдающей поверхностью и жидкостью повысить коэффициенты теплоотдачи при тех же значениях плотностей тепловых потоков.

Теплофизические свойства жидкостей существенно влияют на интенсивность теплоотдачи теплоотдающей поверхности и в связи с принятием Монреальской конвенции, запрещающей использование озоноразрушающих хладагентов, ведется поиск экологически безопасных и нетоксичных рабочих тел, способных обеспечить эффективный теплообмен. В настоящее время все больше внимания уделяется использованию «натуральных» веществ в качестве хладагентов. Это объясняется не только требованиями Монреальского протокола, но и стремлением снизить косвенный и прямой вклад в полный эквивалент глобального потепления холодильного оборудования – TEWI (Total Equivalent Impact). Этого можно достичь выбором хладагентов, имеющих высокую энергетическую эффективность и низкий потенциал глобального потепления. Таким требованиям в

большой степени удовлетворяют углеводороды и, в частности, пропан, обладающий хорошими теплофизическими и термодинамическими характеристиками. Применение пропана в качестве хладагента обеспечивает более высокий холодильный коэффициент и меньшее потребление электроэнергии; у пропана по сравнению с R22 выше коэффициенты теплоотдачи, а по сравнению с изобутаном – лучшие энергетические показатели благодаря меньшему объемному расходу при равной холодопроизводительности и меньшему падению давления в трубах [6, 7].

На основании вышеизложенного в связи с перспективностью применения пропана в холодильных и теплонасосных установках важным становится исследование процессов теплообмена в теплообменной аппаратуре с установлением зависимостей между количественными характеристиками процесса теплообмена при кипении, режимными параметрами и другими факторами, влияющими на интенсивность теплообмена. Важным методом исследования в этом случае является экспериментальный путь, позволяющий решить эти задачи.

III. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В Институте тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова» НАН Беларуси проведены экспериментальные исследования теплообмена при кипении пропана на спеченных капиллярно-пористых поверхностях в диапазоне тепловых потоков $0,1 \div 64 \text{ Вт/м}^2$ и давлений насыщения $0,48 \div 1,08 \text{ МПа}$ ($T_n = 0 \div 30 \text{ }^\circ\text{C}$).

Характеристики исследованных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исследованных образцов

№ образца	Толщина покрытия, $\delta_{\text{кс}}$, мм	Диаметр частиц, $d_{\text{ч}}$, мкм	Средний размер частиц, $\langle d_{\text{ч}} \rangle$, мкм	Средний гидравлический размер пор, \bar{d}_0 , мкм	Капиллярная проницаемость $k \cdot 10^{11}$, м ²
1	0,05±0,06	40÷63	51,5	18,37	0,48
2	0,2				
3	0,3				
4	0,4				
5	0,5				
6	0,3	63÷100	81,5	24,48	0,802
7	0,4				
8	0,5				
9	0,6				
10	0,8				
11	0,4	100÷160	130	35,4	1,553
12	0,5				
13	Медная трубка с покрытием Turbo – В [1]	Пропилен			
14	То же [1]	Пропан			

№ образца	Толщина покрытия, $\delta_{кс}$, мм	Диаметр частиц, d_4 , мкм	Средний размер частиц, $\langle d_p \rangle$, мкм	Средний гидравлический размер пор, \bar{d}_0 , мкм	Капиллярная проницаемость $k \cdot 10^{11}$, м ²
15	Медная трубка с покрытием Ther-moexcel – E [1]			Пропилен	
16	То же [1]			Пропан	
17	0,3±1,0 [2]	100±250	30,2±69,4		

Экспериментальными исследованиями установлено, что кривые кипения (рис. 1, кривые 1÷8) в зависимости от характера теплоотдающей поверхности имели различный вид. Нанесение покрытия приводило к тому, что неразвитое кипение практически отсутствовало на всех типах исследованных поверхностей с покрытием и конвективная область практически сразу переходила в развитое пузырьковое кипение. Неразвитое кипение имело место только для образцов либо с покрытием из крупных фракций, либо при очень малой толщине пористого слоя ($\delta_{кс} = 0,05 \div 0,06$ мм).

Таким образом, нанесение покрытия устранило элемент нестабильности (переходная область) кипения, и конвективный режим теплообмена практически сразу переходил в режим развитого пузырькового кипения. В области развитого пузырькового кипения (рис. 1) на капиллярно-пористой поверхности наблюдалось три участка с различной интенсивностью. На первом участке интенсивность теплоотдачи резко возрастала с ростом плотности теплового потока за счет интенсивной генерации пара в центрах парообразования, число которых интенсивно растет. На втором участке интенсивность теплоотдачи падает из-за слияния паровых пузырей в паровые конгломераты, образующих паровую пленку, перемежающуюся жидкостью между областью генерации пара и поверхностью нагрева, а на третьем участке интенсивность теплоотдачи становится практически автомобильной плотности теплового потока. Кроме того, количество активных центров парообразования на втором и особенно на третьем участке резко сокращается.

Изменение плотности теплового потока для первого участка составляло $1,0 \div 1,5$ кВт/м², для второго – $1,5 \div 20$ кВт/м² и для третьего – $20 \div 63$ кВт/м².

Начало развитого кипения на капиллярно-пористых поверхностях с оптимальными параметрами покрытий наступало гораздо раньше, чем на гладкой поверхности, а коэффициенты теплоотдачи были гораздо выше (в 6÷10 раз).

Янг с соавторами [1] провели ряд экспериментов по определению интенсивности теплоотдачи при кипении углеводородов (пропилен, пропан, изобутан, бутан) на поверхностях с регулярной

геометрией – Ther-moexcel – E и Turbo – B. Авторы провели исследования теплоотдачи при кипении указанных углеводородов при плотностях теплового потока $q = 10 \div 80$ кВт/м² при температуре насыщения 7 °С на трубках диаметром 18,8 мм.

Проведенные исследования [1] показали, что для поверхности Turbo – B и Ther-moexcel – E зависимость $\alpha = f(q)$ в исследованном диапазоне плотностей тепловых потоков для исследованных жидкостей (рис. 1, кривые 13, 14 и 15, 16) имеют неоднозначный характер и кривые кипения также представлены тремя участками (первый участок не показан): при кипении пропана и пропилена на втором участке наклон кривой кипения $n = 0,5$, а на третьем – $n = 0$ (в выражении $\alpha = C \cdot q^n$); при кипении бутана и изобутана значения n на втором участке имеют большую величину. Это говорит о том, что для пропана и пропилена коэффициент теплоотдачи на втором участке зависит от плотности теплового потока в меньшей степени. Кроме того, характер кривых кипения говорит о том, что «запаривание» поверхности Turbo – B и Ther-moexcel – E в исследованном диапазоне режимных параметров имеет место, однако «запаривание» поверхности Turbo – B наблюдается при меньших значениях коэффициента теплоотдачи, чем на поверхности Ther-moexcel – E. Плотность теплового потока для второго участка лежит в диапазоне $10 \div 32$ кВт/м², а для третьего – $32 < q \leq 80$ кВт/м² для обоих типов поверхностей.

Это говорит о том, что при $q > 32$ кВт/м² на поверхности Ther-moexcel – E и Turbo – B при кипении пропана и пропилена все потенциальные центры парообразования становятся активными, начинается «запаривание» поверхности и при дальнейшем увеличении плотности теплового потока коэффициент теплоотдачи не изменяется.

Анализ и сравнение процессов кипения пропана на поверхностях с регулярной геометрией (Ther-moexcel – E и Turbo – B) и на капиллярно-пористых поверхностях показывает, что в исследованном диапазоне плотности теплового потока наиболее интенсивный теплообмен наблюдается на напеченных высокотеплопроводных КПП в области $1 < q \leq 20$ кВт/м², но процесс «запаривания»

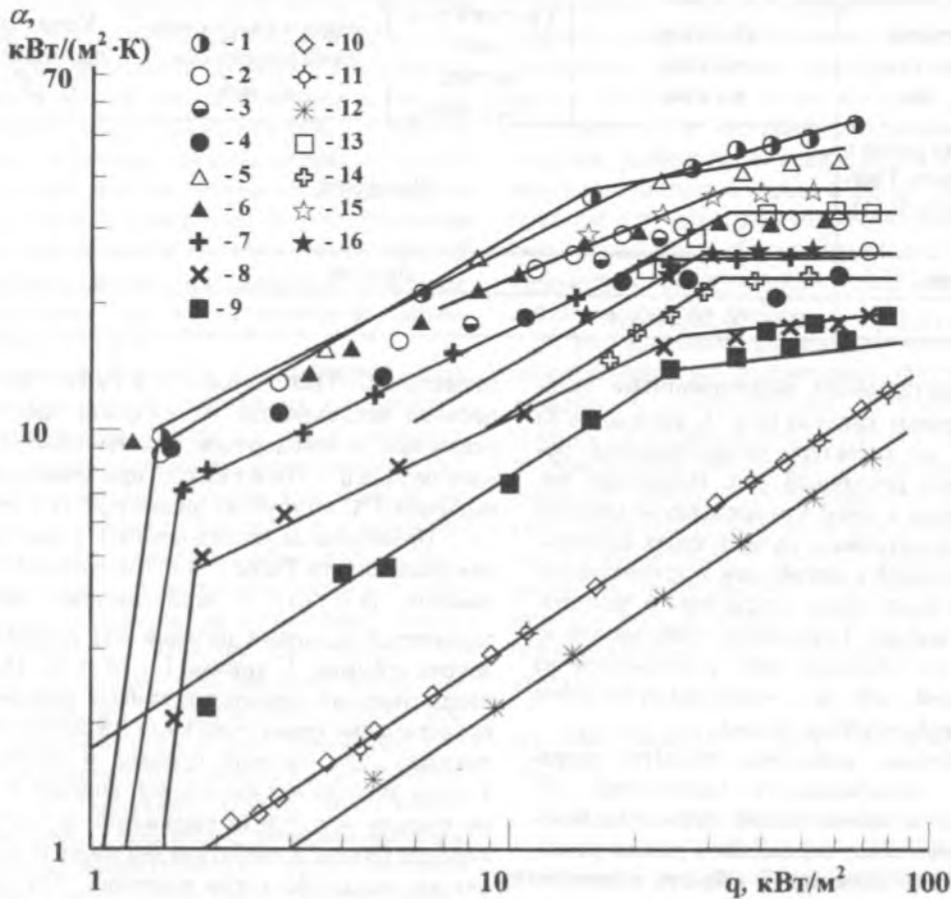


Рис.1. Интенсивность теплообмена при кипении пропана при $T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$:

1 — образец № 1, 2 — № 2, 3 — № 3, 4 — № 4, 5 — № 5, 6 — № 6, 7 — № 7,
8 — № 8, 9 — образец из нержавеющей стали с напыленным покрытием ($\epsilon = 13\%$, $\delta = 0,3\text{ мм}$),
10 — медная трубка без покрытия, 11 — медная трубка без покрытия, 12 — полированная труба из нержавеющей стали, 13,14 — медная трубка с покрытием типа Turbo-B (пропилен и пропан соотв.) [1], 15, 16 — медная трубка с покрытием типа Thermoexel-E (пропилен и пропан) [1]

на КПП наступает значительно раньше ($q_{\text{сдт}} \geq 20\text{ кВт/м}^2$), чем на поверхности Thermoexel – E и Turbo – B ($q > 32\text{ кВт/м}^2$). Для испарителей холодильных и теплонасосных установок, работающих, как правило, при тепловых потоках до $6\text{--}12\text{ кВт/м}^2$ предпочтительной поверхностью является капиллярно-пористая, имеющая наибольшие значения коэффициентов теплоотдачи при отсутствии в хладагенте смазочного масла (сорбционные холодильные и теплонасосные установки). Для парокompрессионных установок, в которых смазочное масло присутствует в хладагенте, предпочтительной поверхностью является оребренная.

Балакришнан [2], проводя анализ интенсивности теплоотдачи при кипении жидкого кислорода в воздухоразделительных установках на различных типах развитых поверхностей, отмечает, что наибольшая интенсивность теплоотдачи достигается на высокотеплопроводных напеченных пористых структурах. Сравнивая зависимости $q = f(\Delta T)$ при кипении этанола, пропилена, воды и R11 на поверхности High Flux автор работы [2]

приходит к выводу, что наименьший перегрев начала кипения имеет этанол, а наибольший перегрев – R11. Это говорит о том, что перегрев ΔT зависит от теплофизических свойств кипящей жидкости и для установления связи начала перегрева, режимных параметров и геометрических характеристик теплоотдающей поверхности необходимы широкомасштабные экспериментальные исследования процессов кипения различных жидкостей на развитых поверхностях различного типа.

Далее автор работы [2] отмечает зависимость коэффициента теплоотдачи кипящей жидкости от пористости и размера пор, однако на эту зависимость значительное влияние оказывает поверхностное натяжение исследуемой жидкости. Анализируя влияние типа и геометрических характеристик пористой поверхности (размера частиц и толщины слоя) на интенсивность теплоотдачи при кипении R12 и R22 автор приходит к выводу, что наиболее эффективным является напеченное покрытие (по сравнению с напыленным) и оптимальная толщина покрытия составляет $0,3\pm 1,0\text{ мм}$. Наилучшие ре-

зультаты получены при толщине слоя 0,5 мм (рис. 3). При кипении R11 и R113 оптимальная толщина покрытия составила 1,0 мм при размере частиц 0,25 мм (рис. 2).

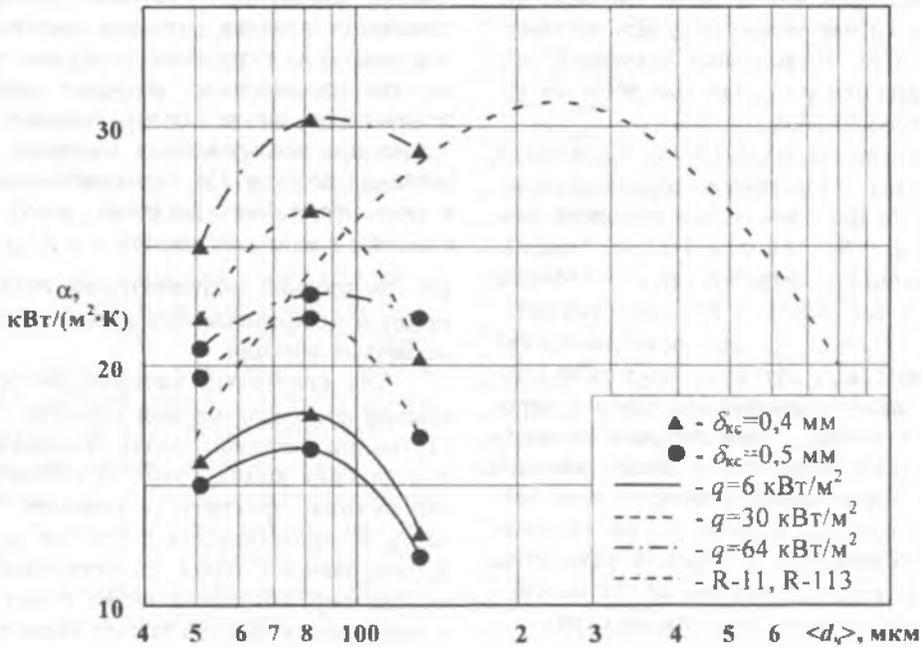


Рис. 2. Влияние среднего диаметра частиц на интенсивность теплоотдачи при различных тепловых потоках, ($T_n = 20$ °С) при кипении пропана

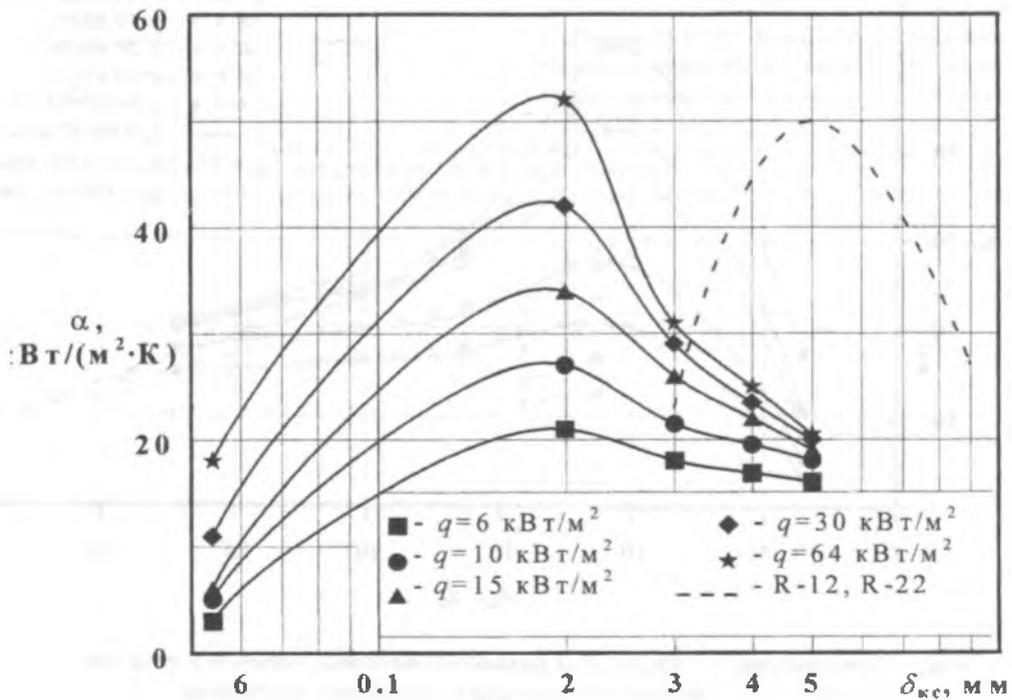


Рис. 3. Зависимость $\alpha = f(\delta_{кс})$ при различных тепловых потоках для фракции $d_n = 40 \div 63$ мкм, $T_n = 20$ °С при кипении пропана

Таким образом, анализируя приведенные в работах [1] и [2] результаты интенсивности теплоотдачи при кипении различных жидкостей на пористых поверхностях с различными геометрическими характеристиками, можно сделать вывод о

том, что влияние последних на коэффициент теплоотдачи можно рассматривать только при кипении определенного вида жидкостей, имеющих одинаковые или близкие теплофизические свойства. Поэтому для определения влияния толщины

пористого слоя и размера частиц на интенсивность теплоотдачи при кипении необходимы экспериментальные исследования в этом направлении. Только в этом случае можно получить достоверные данные об их оптимальных значениях, при которых достигаются максимальные значения коэффициентов теплоотдачи.

При кипении пропана на исследованных поверхностях [3]÷[5] максимальный коэффициент теплоотдачи имел место при значении диаметра частиц $d_p = 80 \div 100$ мкм. Из рис. 2 видно, что при значении диаметра частиц $d_p > 100$ мкм интенсивность теплоотдачи начинает снижаться для всех величин $\delta_{кс}$ при всех значениях плотностей тепловых потоков. Это можно объяснить уменьшением количества центров парообразования в связи с уменьшением площади контакта кипящей жидкости и теплоотдающей поверхности. Интенсивность теплоотдачи также снижалась при $d_p < 63$ мкм, очевидно, из-за ухудшения условий отвода паровой фазы из-за возрастающего гидравлического сопротивления пароотводящих каналов (фильтрации пара).

Интенсивность теплоотдачи при кипении на спеченных капиллярно-пористых поверхностях, состоящих из мелких фракций, в значительной

мере зависит от гидравлического сопротивления выхода пара из зоны парообразования к внешней границе спеченного покрытия. Проведенные исследования влияния толщины спеченных покрытий (рис. 3) на интенсивность теплоотдачи показали, что максимальные значения коэффициентов теплоотдачи соответствуют толщине структуры 0,2 мм при исследованных значениях плотностей тепловых потоков. Но экспериментальные данные в этом случае более наглядно могут быть представлены в виде зависимости $\alpha = f(\delta_{кс}/d_0)$ (рис. 4), так как средний гидравлический размер пор \bar{d}_0 является постоянным при всех значениях $\delta_{кс}$ для различных фракций.

Для спеченных капиллярно-пористых покрытий при безразмерной толщине слоя $\delta_{кс}/d_0 < 11$ (малые толщины слоя) гидравлические сопротивления выходу пара из покрытия малы и пар выходит практически свободно. В этой области α увеличивается с ростом $\delta_{кс}$ в связи с формированием более разветвленной системы мелких пор, обеспечивающих подачу жидкости к поверхности нагрева за счет капиллярных сил.

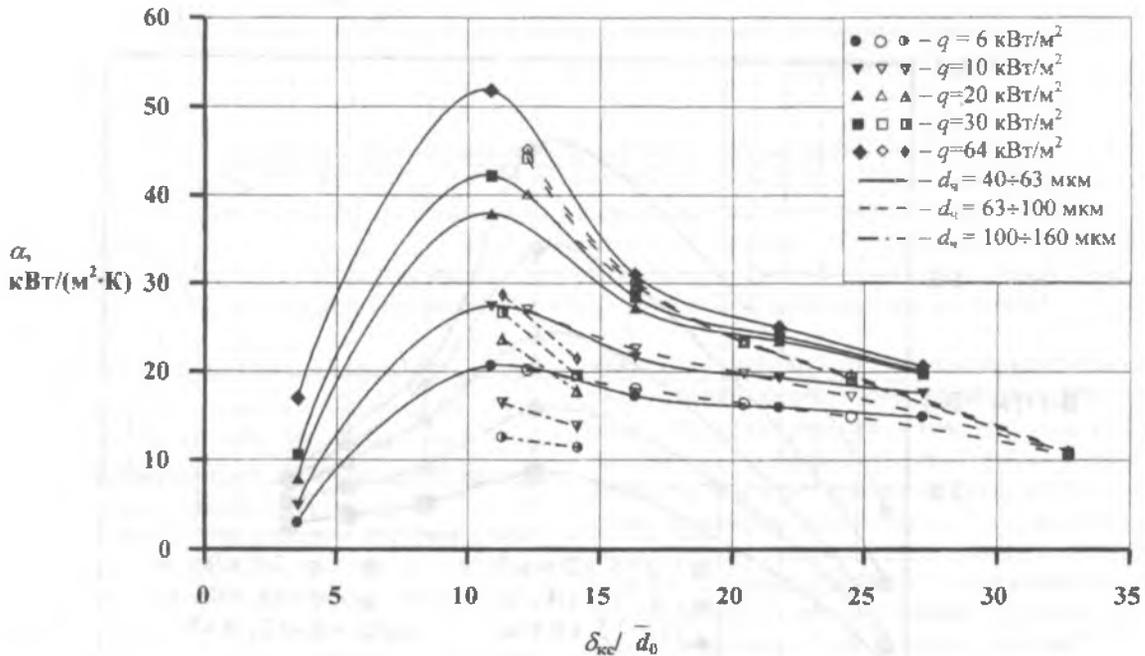


Рис. 4. Зависимость $\alpha = f(\delta_{кс}/d_0)$ для различных тепловых потоков и фракций при $T_1 = 20$ °С при кипении пропана на спеченных покрытиях

При $\delta_{кс}/d_0 = 11 \div 12,5$ коэффициент теплоотдачи достигает максимальных значений, и дальнейший рост толщины покрытия $\delta_{кс}/d_0 > 12,5$ приводит к уменьшению значений α в связи с ростом гидравлического сопротивления фильтрации пара. Таким образом, зависимость, представленная на рис.4 учитывает практически все характеристики пористой структуры $\delta_{кс}$, d_p , d_0

IV. ВЫВОДЫ

1. Анализ процесса теплообмена в области развитого пузырькового кипения на спеченной капиллярно-пористой структуре показывает, что на кривой кипения наблюдается три участка с различной интенсивностью. На первом участке интенсивность теплоотдачи резко возрастает с ростом плотности теплового по-

тока за счет интенсивной генерации пара в центрах парообразования, число которых интенсивно растет. На втором участке интенсивность теплоотдачи падает из-за слияния паровых пузырей в паровые конгломераты, образующие паровую пленку между областью генерации пара и поверхностью нагрева. Возникающие конгломераты перемежаются кипящей жидкостью; количество активных центров парообразования на втором участке резко сокращается. На третьем участке интенсивность теплоотдачи становится автоматической относительно плотности теплового потока из-за того, что область генерации пара отделена от поверхности нагрева сплошной пленкой пара и активные центры парообразования практически отсутствуют.

2. На основании анализа экспериментальных исследований [1]–[5] выявлена зависимость интенсивности теплоотдачи при кипении пропана, R12 и R22 на медных спеченных капиллярно-пористых покрытиях от параметров пористой структуры в исследованном диапазоне плотностей тепловых потоков: наибольшая интенсивность теплоотдачи достигалась при значении толщины пористого слоя $\delta_{кс} = 0,2$ мм при кипении пропана и $0,3 \div 1,0$ мм при кипении R12 и R22, что соответствует безразмерному соотношению $\delta_{кс} / \bar{d}_0 = 9,9 \div 14,4$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dongsoo Jung, Heungseok Lee, Dongsoo Bae, Jongchul Ha. Nucleate boiling transfer coefficients of flammable refrigerants on various enhanced tubes // International Journal of Refrigeration. 2005. No 28. – P. 451–455.
2. Balakrishnan A. R. Boiling Heat Transfer over Porous Surfaces // Advances in sorption based thermal devices//Belarus – Indian Scientific Seminar. November 2÷3, 2004. – P. 78÷91.
3. Васильев Л. Л., Овсянник А. В., Журавлев А. С., Новиков М. Н. Особенности влияния давления на интенсивность теплоотдачи при кипении пропана на высокотеплопроводной пористой поверхности // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. — Гомель, 2001. — № 2. — С. 14÷19.
4. Васильев Л. Л., Овсянник А. В., Новиков М. Н., Журавлев А. С. Влияние давления на интенсивность теплоотдачи при кипении пропана на пористой поверхности // Тр. XIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». — СПб., 2001. — Т. 1. — С. 329÷332.
5. Васильев Л. Л., Овсянник А. В., Новиков М. Н., Журавлев А. С. Экспериментальное исследование влияния характеристик капиллярно-пористого покрытия на теплообмен при кипении пропана // Тр. XIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». — СПб., 2001. — Т. 1. — С. 341÷344.
6. Железный В. П., Хлиева О. Я., Быковец Н. П. Перспективы и проблемы применения углеводородов в качестве хладагентов // Холодильная техника. — 2002. — № 7. — С. 14÷16.
7. Железный В. П., Хлиева О. Я., Быковец Н. П. Перспективы и проблемы применения углеводородов в качестве хладагентов // Холодильная техника. — 2002. — № 8. — С. 5÷9.

Поступила в редакцию 25.05.2005 г., принята к печати 10.08.2005 г.