

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗВИТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ

А.В. ОВСЯННИК

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

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 использованию 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 парокompрессионных ТНУ или снижению затраченной теплоты в сорбционных ТНУ при неизменных параметрах рабочего тела в конденсаторе. Однако повышение температуры низкопотенциального источника теплоты приводит к увеличению температурного напора между теплоотдающей поверхностью испарителя и температурой кипения рабочего тела, что снижает энергетическую эффективность испарителя и ведет к увеличению потерь.

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. Вклад в решение этих проблем может внести внедрение научно обоснованных и экспериментально проверенных методов интенсификации теплообмена при кипении путем развития теплоотдающей поверхности.

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

Постановка задачи

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

Несмотря на большое количество работ по теплообмену при кипении, их результаты не полностью отражают процессы теплообмена на развитых поверхностях, еще не достаточно полно исследованы специфические особенности теплообмена, связанные с влиянием геометрических параметров и вида поверхности. В работах по кипению на поверхностях с пористыми покрытиями часто отсутствует полная информация о свойствах покрытий, поэтому интерпретация и практическое использование экспериментальных данных часто вызывают затруднения.

Применение высокоэффективных методов интенсификации теплообмена в теплообменных 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, необходимо вести 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.

Обсуждение полученных результатов

В ГНУ «Институт 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 $0,1\text{--}64 \text{ Вт/м}^2$ и давлений насыщения $0,48\text{--}1,08 \text{ МПа}$ ($T_n = 0\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$). Экспериментальными исследованиями установлено, что кривые кипения (рис. 1) 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 ($\delta_{\text{кк}} = 0,05\text{--}0,06 \text{ мм}$).

Таким образом, нанесение покрытия устраняло элемент неустойчивости (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.

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 – Thermoexcel-E и Turbo-B. Авторы [1] провели исследования теплоотдачи при кипении указанных углеводородов при плотностях теплового потока $q = (10...80) \text{ кВт/м}^2$ при температуре насыщения $7 \text{ }^\circ\text{C}$ на трубках диаметром 18,8 мм.

Проведенные исследования [1] показали, что для поверхности Turbo-B зависимость $\alpha = f(q)$ в исследованном диапазоне плотностей тепловых потоков для исследованных жидкостей (рис. 1) имеет неоднозначный характер и кривая кипения представлена тремя участками: при кипении пропана и пропилена на втором участке наклон кривой кипения $n = 0,5$, а на третьем – $n = 0$ (в выражении $\alpha = Cq^n$); 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 «запаривания» поверхности Turbo-B в исследованном диапазоне режимных параметров имеет место и наблюдается при меньших значениях коэффициента теплоотдачи, чем на поверхности Thermoexcel – E. Плотность теплового потока для второго участка лежит в диапазоне $10...32 \text{ кВт/м}^2$, а для третьего – $32 < q \leq 80 \text{ кВт/м}^2$.

При кипении пропана и пропилена на поверхности Thermoexcel-E кривая кипения имеет отличия по сравнению с поверхностью Turbo-B; интенсивность теплоотдачи пропана при кипении его на поверхности Thermoexcel-E в 1,2...1,5 раза выше, и начиная с плотности теплового потока 32 кВт/м^2 наклон кривой кипения также отсутствует ($n = 0$) и интенсивность теплоотдачи не зависит от q . Это говорит о том, что при $q > 32 \text{ кВт/м}^2$ на поверхности Thermoexcel-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. На рис. 1 приведены кривые кипения пропана и пропилена, полученные Янгом с соавторами [1].

Анализ и сравнение процессов кипения пропана на поверхностях с регулярной геометрией (Thermoexcel-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 $1 < q \leq 20 \text{ кВт/м}^2$, но процесс «запаривания» на КПП наступает значительно

раньше ($q_{\text{зап}} \geq 20$ кВт/м²), чем на поверхности Thermoexcel-E и Turbo-B ($q > 32$ кВт/м²). Однако для испарителей холодильных и теплонасосных установок, работающих, как правило, при тепловых потоках до 6...12 кВт/м² 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.

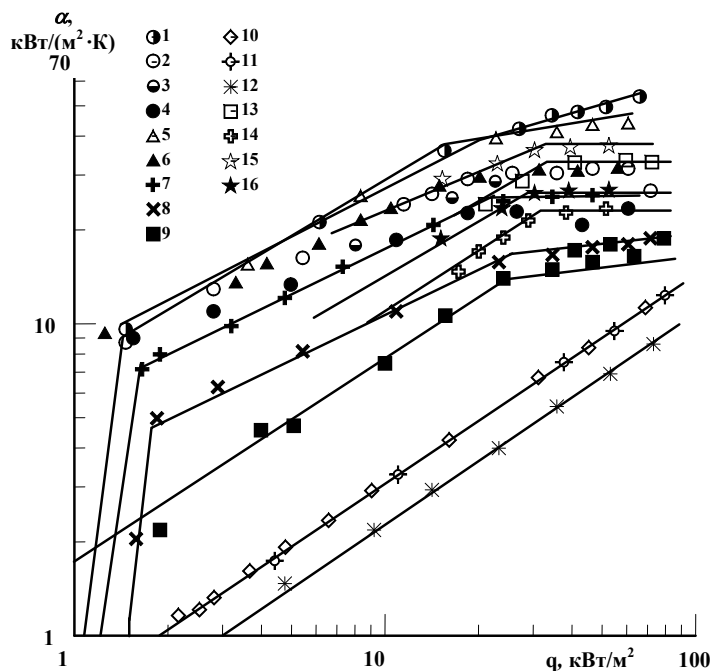


Рис. 1. Интенсивность теплообмена при кипении пропана при $T_n = 20$ °С; 1 – образец № 1, 2 – № 2, 3 – № 3, 4 – № 4, 5 – № 5, 6 – № 6, 7 – № 7, 8 – № 8, 9 – образец из нержавеющей стали с напыленным покрытием ($\epsilon = 13$ %, $\delta = 0,3$ мм), 10 – медная трубка без покрытия, 11 – медная трубка без покрытия, 12 – полированная труба из нержавеющей стали, 13, 14 – медная трубка с покрытием типа Turbo-B (пропилен и пропан соответственно), 15, 16 – медная трубка с покрытием типа Thermoexcel-E (пропилен и пропан) [1]

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 R-11 на поверхности High Flux автор [2] приходит к выводу, что наименьший перегрев начала кипения имеет этанол, а наибольший перегрев – R-11. Это говорит о том, что ΔT зависит от теплофизических свойств кипящей жидкости и для установления связи ΔT начала перегрева, режимных параметров и геометрических характеристик теплоотдающей поверхности необходимы широкомасштабные экспериментальные исследования процессов кипения различных жидкостей на развитых поверхностях различного типа.

Далее автор [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 R-12 и R-22, автор [2] приходит к выводу, что наиболее эффективным является напеченное покрытие (по сравнению с напыленным) и оптимальная толщина покрытия составляет 0,3...1,0 мм. Наилучшие результаты получены

при толщине слоя 0,5 мм. При кипении R-11 и R-113 оптимальная толщина покрытия составила 1,0 мм при размере частиц – 0,25 мм.

Таким образом, анализируя приведенные в [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 $d_{\text{ч}} = 80 - 100$ мкм. Из рис. 2 видно, что при значении диаметра частиц $d_{\text{ч}} > 100$ мкм интенсивность теплоотдачи начинает снижаться для всех величин $\delta_{\text{кк}}$ 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 $d_{\text{ч}} < 63$ мкм, что можно объяснить ухудшением 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 (рис. 4) могут быть представлены в виде зависимости $\alpha = f(\delta_{\text{кк}} / \bar{d}_0)$, так как средний гидравлический размер пор \bar{d}_0 является постоянным при всех значениях $\delta_{\text{кк}}$ для различных фракций.

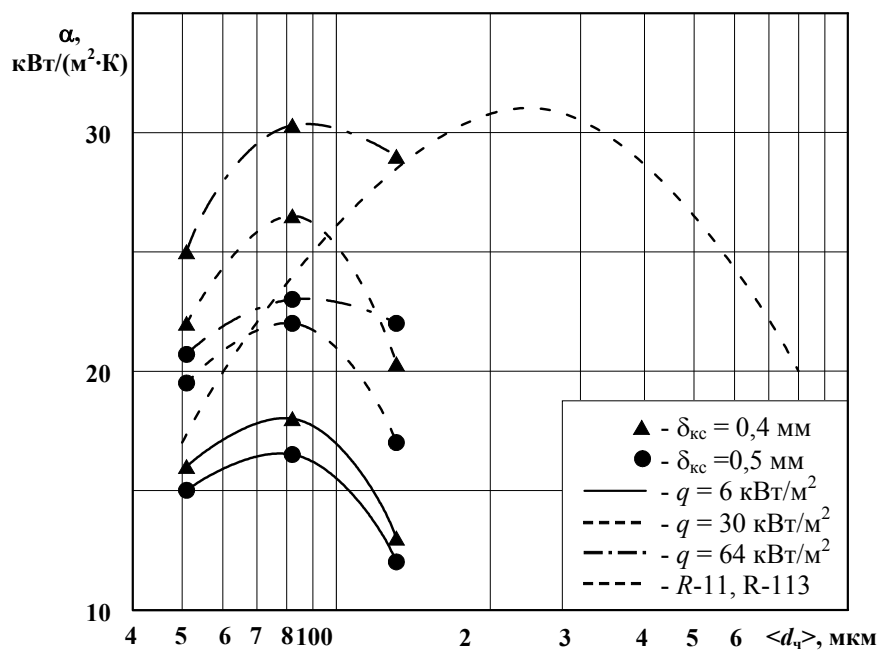


Рис. 2. Влияние среднего диаметра частиц на интенсивность теплоотдачи при различных тепловых потоках ($T_n = 20^\circ\text{C}$)

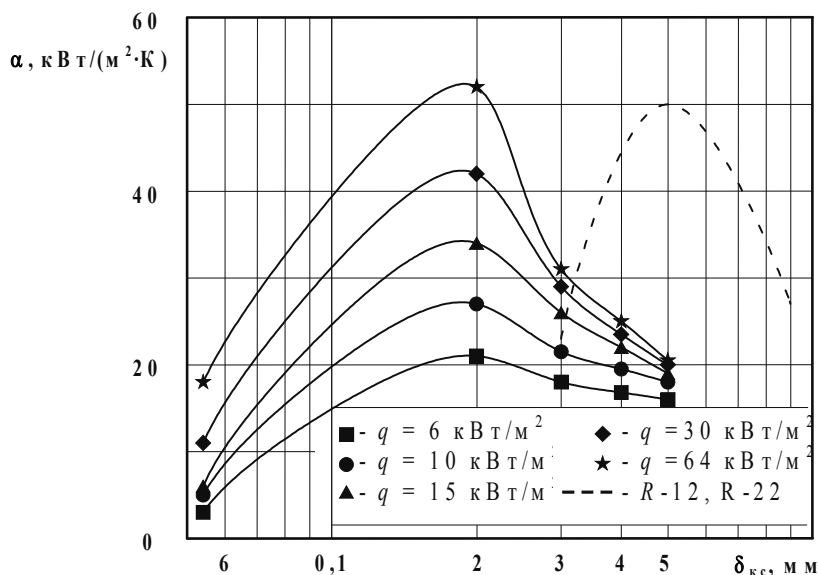


Рис. 3. Зависимость $\alpha = f(\delta_{\text{kc}})$ при различных тепловых потоках для фракции с $d_q = 40 \div 63 \text{ мкм}$, $T_n = 20^\circ\text{C}$

Для спеченных капиллярно-пористых покрытий при безразмерной толщине слоя $\delta_{\text{kc}}/\bar{d}_0 < 11$ (малые толщины слоя) гидравлические сопротивления выходу пара из покрытия малы и пар выходит практически свободно. В этой области α увеличивается с ростом δ_{kc} в связи с формированием более разветвленной системы мелких пор, обеспечивающих подачу жидкости к поверхности нагрева за счет капиллярных сил. При $\delta_{\text{kc}}/\bar{d}_0 = 11 \div 12,5$ коэффициент теплоотдачи достигает максимальных значений и дальнейший рост толщины покрытия $\delta_{\text{kc}}/\bar{d}_0 > 12,5$ 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 (δ_{kc} , d_q , \bar{d}_0).

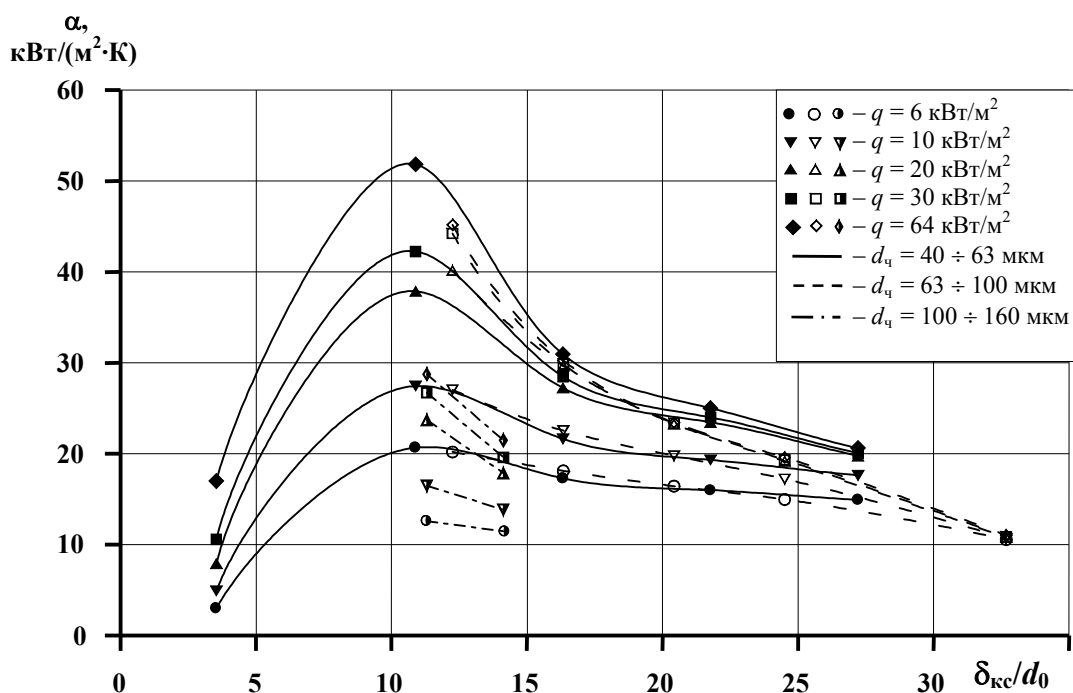


Рис. 4. Зависимость $\alpha = f(\delta_{\text{кс}}/\bar{d}_0)$ для различных тепловых потоков и фракций при $T_{\text{н}} = 20^\circ\text{C}$

При кипении R-12 и R-22 [2] Балакришнан получил оптимальную толщину напеченного покрытия 0,3...1,0 мм при размере частиц 0,1...0,25 мм, что соответствует безразмерной толщине слоя $9,9 \leq \frac{\delta_{\text{кс}}}{d_0} \leq 14,4$.

В процессе исследований теплоотдачи при кипении пропана на капиллярно-пористой структуре были выявлены особенности влияния давления на коэффициент теплоотдачи в зависимости от плотности теплового потока и параметров пористого покрытия. Данные были представлены в виде зависимости $\alpha = f(p/p_{\text{кр}})$ (рис. 5), так как степень этого влияния зависит от области рабочих давлений. Из рис. 5 следует, что с повышением плотности теплового потока степень влияния давления снижается и это объясняется уменьшением перегрева поверхности, необходимого для вскипания жидкости. По мере возрастания плотности теплового потока количество активных центров парообразования уменьшается и при высоких плотностях тепловых потоков интенсивность теплоотдачи становится автомодельной относительно давления. Это говорит о том, что практически все потенциальные центры парообразования становятся парогенерирующими.

Зависимость $\alpha = C(p/p_{\text{кр}})^k$, представленная на рис. 6, позволяет определить влияние толщины пористой структуры на интенсивность теплоотдачи при изменении давления насыщения. Увеличение $\delta_{\text{кс}}$ при небольших тепловых потоках приводит к снижению показателя степени k .

При больших тепловых потоках ($q = 64 \text{ кВт/м}^2$) увеличение $\delta_{\text{кс}}$ приводит к незначительному снижению k . Кроме того, из рис. 6 следует, что средний гидравлический размер пор не оказывает заметного влияния на интенсивность теплоотдачи при изменении давления насыщения.

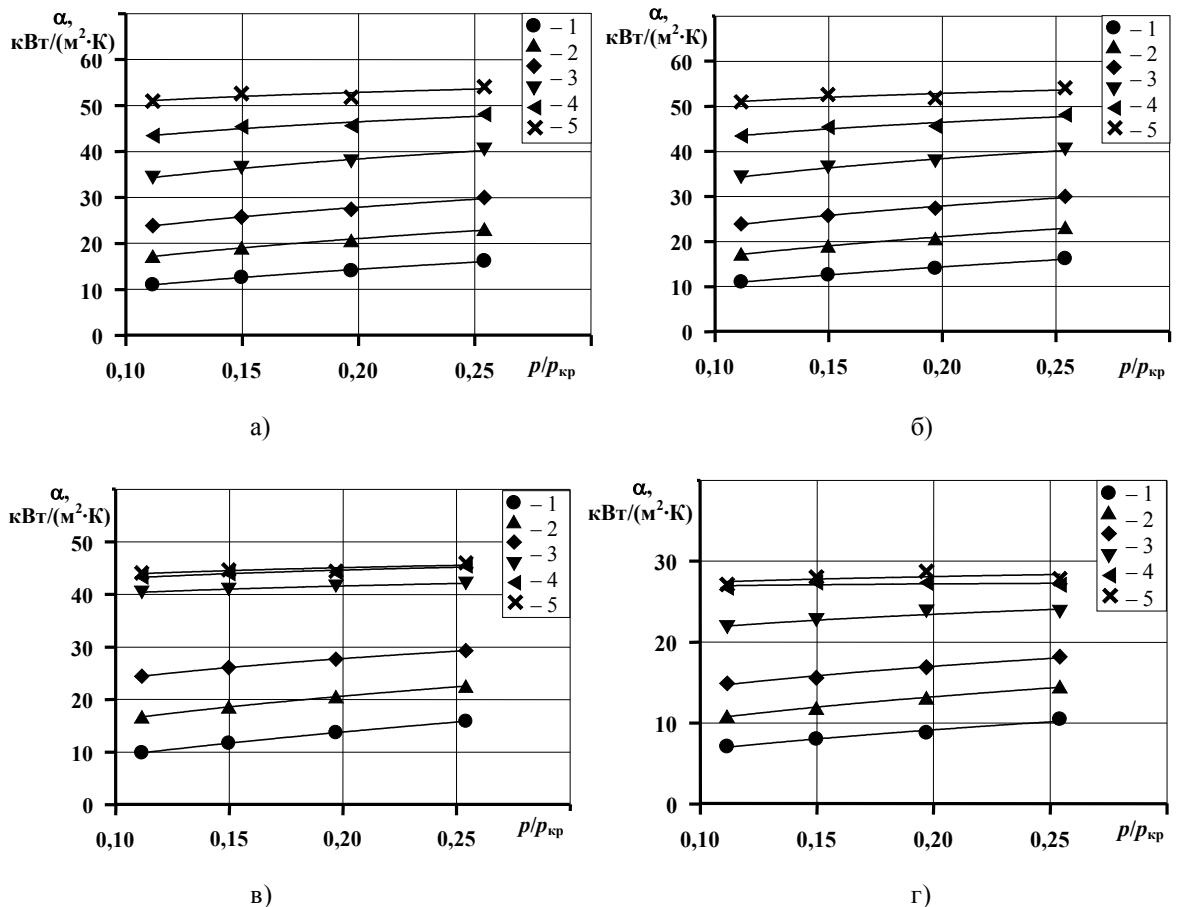


Рис. 5. Зависимость $\alpha = f(p/p_{кр})$: a – образец без покрытия; b – $d_i = 40 \div 63$ мкм и $\delta_{кс} = 0,2$ мм; b – $d_i = 63 \div 100$ мкм и $\delta_{кс} = 0,3$ мм; c – $d_i = 100 \div 160$ мкм и $\delta_{кс} = 0,4$ мм; $1 - q = 3$ кВт/м², $2 - q = 6$ кВт/м², $3 - q = 10$ кВт/м², $4 - q = 20$ кВт/м², $5 - q = 40$ кВт/м², $6 - q = 64$ кВт/м²

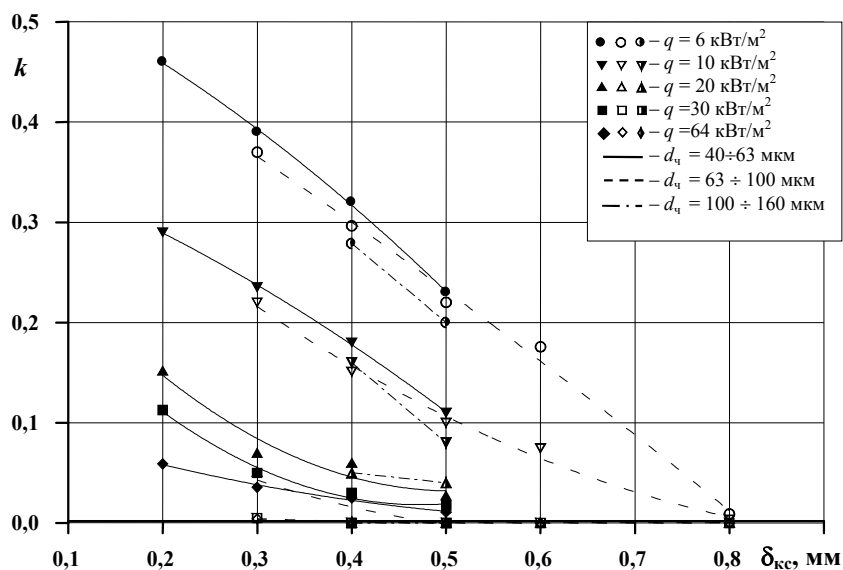


Рис. 6. Зависимость показателя степени k в соотношении $\alpha = C(p/p_{кр})^k$ от толщины пористого покрытия $\delta_{кс}$ при различных плотностях теплового потока для различных фракций при кипении пропана

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 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, 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 автомодельной 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 выявлена зависимость интенсивности теплоотдачи при кипении пропана R-12 и R-22, на медных спеченных капиллярно-пористых покрытиях от параметров пористой структуры и давления насыщения в исследованном диапазоне плотностей тепловых потоков:

– наибольшая интенсивность теплоотдачи достигалась при значении толщины пористого слоя $\delta_{кс} = 0,2$ мм при кипении пропана и $0,3 \dots 1,0$ мм при кипении R-12 и R-22,

что соответствует безразмерному соотношению $9,9 \leq \frac{\delta_{кс}}{d_0} \leq 14,4$;

– повышение давления насыщения при кипении пропана на капиллярно-пористых покрытиях интенсифицирует теплообмен при $q < 64$ кВт/м² для мелких фракций и при $q < 20 \dots 40$ кВт/м² для средних и крупных фракций, а в областях, превышающих указанные значения q , интенсивность теплоотдачи практически не зависит от давления.

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. 28 (2005). 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. Особенности влияния давления на интенсивность теплоотдачи при кипении пропана на высокотеплопроводной пористой поверхности /Л.Л. Васильев [и др.] //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель. – 2001. – № 2. – С. 14-19.
4. Влияние давления на интенсивность теплоотдачи при кипении пропана на пористой поверхности /Л.Л. Васильев [и др.] //Гр. 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. Экспериментальное исследование влияния характеристик капиллярно-пористого покрытия на теплообмен при кипении пропана /Л.Л. Васильев [и др.] //Гр. 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. Перспективы и проблемы применения углеводородов в качестве хладагентов /В.П. Железный, О.Я. Хлиева, Н.П. Быковец //Холодильная техника. – 2002. – № 7. – С 14-16.
7. Железный, В.П. Перспективы и проблемы применения углеводородов в качестве хладагентов /В.П. Железный, О.Я. Хлиева, Н.П. Быковец //Холодильная техника. – 2002. – № 8. – С. 5-9.

Получено 15.04.2005 г.