

УДК 536.24

ТЕЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ПРОПАНА НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ СО СПЕЧЕННЫМ ПОРИСТЫМ ПОКРЫТИЕМ

М.Н. НОВИКОВ*Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого, Республика Беларусь*

Проведено экспериментальное исследование кипения пропана в большом объеме на поверхности с медным спеченным капиллярно-пористым покрытием. Описано влияние плотности теплового потока и характеристик пористой структуры на характер кривой кипения.

Введение

В теплообменных аппаратах, используемых в энергетике, химической промышленности, холодильной технике, в двухфазных теплопередающих устройствах (тепловых трубах) рабочие процессы связаны с генерацией пара. Создание более эффективных и компактных теплообменных аппаратов обеспечивает существенную экономию ресурсов и трудозатрат и поэтому является актуальной и приоритетной научно-технической проблемой.

Исследованиями многих авторов [1–7] показано, что активация парогенерирующих поверхностей путем нанесения на них различных типов пористых покрытий приводит к существенной интенсификации теплообмена при кипении. Формы кривых кипения и коэффициенты теплоотдачи определяются характеристиками покрытий: их геометрией, теплопроводностью скелета, пористостью, проницаемостью, смачиваемостью, а также свойствами кипящих жидкостей и режимами теплообмена.

Количество работ, посвященных кипению углеводородов (пропан, пропилен, бутан и др.), являющихся альтернативой фреонам в холодильной технике, на поверхностях с пористыми покрытиями незначительно и касается лишь отдельных типов поверхностей. Поэтому исследования по теплообмену и оптимизации структуры пористого покрытия при кипении углеводородов представляют несомненный интерес и являются актуальными.

1. Экспериментальная установка

Для исследований теплообмена при кипении сжиженного пропана в АНК ИТМО НАНБ был создан экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 1. Экспериментальные образцы устанавливались на рабочий участок 12. Рабочий участок с помощью фланцевого соединения размещался в центре горизонтального цилиндрического блока экспериментальной камеры 1, изготовленной из нержавеющей стали. Экспериментальная камера и вспомогательный сосуд 6 для заполнения ее пропаном были расположены в климатической камере 2 и соединялись с вакуумной системой 7 и контуром нагрева-охлаждения. Для поддержания в климатической камере температуры, равной температуре насыщения (от -10 до $+50$ °С), стенки камеры оснащены системой каналов 5, по которым прокачивалась обогревающая (из термостатов 14) либо охлаждающая (из холодильных машин 15) жидкость.

Тепловой поток к образцам подводился электрическим нагревателем через медную цилиндрическую оболочку (наружный диаметр 16,5 мм, толщина стенки 2,25 мм), которая крепилась на держателе из нержавеющей стали. Зазор между внут-

ренной поверхностью образца и оболочкой заполнялся высокотеплопроводной пастой. Для исключения возможности бокового подтока жидкости к поверхности нагрева, а также образования щелей, которые могли бы стать источниками центров парообразования, с торцов образцы уплотнялись резиновыми кольцами и фторопластовыми втулками. Три иллюминатора, расположенные напротив рабочего участка, позволяли проводить визуальное наблюдение и фотографирование процесса кипения.

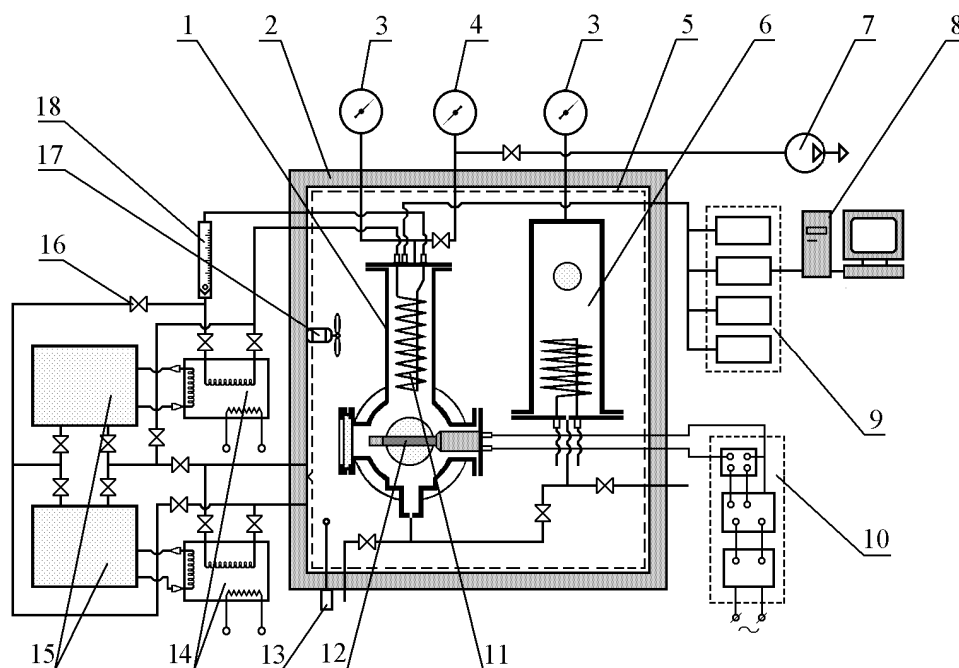


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – экспериментальная камера; 2 – климатическая камера; 3 – манометр; 4 – вакуумметр; 5 – жидкостный контур; 6 – вспомогательная камера; 7 – вакуумная система; 8 – ПЭВМ; 9 – цифровой измерительный комплекс; 10 – электроизмерительная система нагревателя; 11 – рабочий участок; 12 – индикатор углеводородов; 13 – термостат; 14 – холодильная машина; 15 – вентиль; 16 – вентилятор; 17 – расходомер; 18 – расходомер.

Для измерения температуры исследуемого образца трубы использовались сваренные медь-константановые термопары с толщиной проводников 0,2 мм. Тарировка термопар производилась в диапазоне $-10 \div 100$ °С. Температура насыщения определялась четырьмя из них, размещенными в жидкости и паровом пространстве, и контролировалась образцовым манометром 3. Перепад температуры между поверхностью трубы и жидкостью измерялся непосредственно четырьмя дифференциальными термопарами, один спай которых располагался в образце, а второй – в жидкости. Сбор и обработка информации производилась автоматизированным комплексом 9, в состав которого входили: коммутатор измерительных сигналов Ф7078К, цифровой вольтметр В7–34 и ПЭВМ.

2. Технология изготовления экспериментальных образцов

Опытные образцы изготавливались в виде втулок из медной трубки размером $\varnothing 20 \times 1,75$ мм, на наружной поверхности которых напекалась капиллярно-пористая структура из разных фракций порошка меди марки ПМС-Н. Изготовление капиллярно-пористой структуры осуществлялось методом спекания свободной засыпки в среде аргона в течение 1 часа при температуре от 1030 °С до 1050 °С. Для всех ис-

следованных спеченных капиллярно-пористых структур из разных фракций порошка меди марки ПМС-Н, изготовленных методом свободной засыпки, открытая пористость составляла 50÷55%.

В таблице приведены характеристики исследованных образцов, полученных спеканием свободно насыпанного порошка меди марки ПМС-Н.

Таблица

Характеристики исследованных образцов

№ образца	Толщина покрытия, $\delta_{кс}$, мм	Диаметр частиц, d_c , мкм	Средний гидравлический размер пор, d_f , мкм	Капиллярная проницаемость, $k \cdot 10^{11}$, м ²
1	0,2	-63...+40	18,37	0,48
2	0,3	-	-	-
3	0,5	-	-	-
4	0,3	-100...+63	24,48	0,8
5	0,4	-	-	-
6	0,6	-	-	-
7	0,4	-160...+100	35,4	1,55
8	0,5	-	-	-
9	0,5	-200...+160	48,8	2,76

3. Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные образцы представляли собой горизонтальные трубы длиной 100 мм, наружным диаметром 20 мм. В стенку трубы зачеканивались спаи медь-константановых термопар. Перед установкой образца внутренние стенки экспериментальной камеры и теплообменная поверхность протирались этанолом или ацетоном. После герметизации из камеры с помощью форвакуумного насоса удалялся воздух. Перед проведением эксперимента для удаления пузырьков неконденсирующихся газов, которые могли находиться внутри покрытия, образцы кипятились в течение 12 часов. После отключения тепловой нагрузки и прекращения кипения на поверхности образцов с помощью жидкостного контура внутри рабочей камеры устанавливались условия насыщения для жидкости. Затем включался основной нагреватель для подвода теплового потока к поверхности исследуемого образца. Условия насыщения в рабочей камере поддерживались регулированием расхода охлаждающей жидкости через конденсатор. Контроль давления насыщения осуществлялся с помощью образцового манометра с точностью $\pm 6,4 \cdot 10^3$ Па. Измерительная система работала в циклическом режиме опроса термопар через определенный промежуток времени. Скорость опроса составляла 10 измерений в секунду. После достижения установившегося режима теплообмена, определяемого по выводимым данным на дисплей, производилась регистрация показаний термопар. Длительность выхода температуры поверхности нагрева на постоянное значение составляла от 15 до 60 минут. Затем изменялась величина подводимого теплового потока и процедура повторялась для получения следующей экспериментальной точки. Экспериментальные исследования проводились при постепенном увеличении тепловой нагрузки до достижения максимально возможной ее величины. Далее тепловой поток плавно уменьшался. Начало кипения жидкости на поверхности нагрева определялось визуально в момент активации первых центров парообразования и по резкому снижению перегрева поверхности.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по формуле, используемой для гладкой трубы:

$$\alpha = \frac{q}{T_c - T_n}$$

где q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; T_c – температура стенки, $^{\circ}\text{C}$; T_n – температура насыщения, $^{\circ}\text{C}$.

Перепад температуры $\Delta T = T_c - T_n$ между наружной поверхностью гладкой трубы и жидкостью в состоянии насыщения определялся по среднему значению четырех дифференциальных термопар с учетом падения температуры внутри стенки трубы. Подводимый к поверхности образцов тепловой поток определялся с учетом тепловых потерь через держатель рабочего участка. Последние рассчитывались по показаниям двух дифференциальных термопар, установленных на держателе.

Для того, чтобы удостовериться в надежности полученных опытных данных, на экспериментальной установке были проведены опыты на гладкой поверхности по методике, описанной выше. Как видно из рис.2, опытные данные настоящего исследования удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов, полученными другими авторами [8–9] на гладких горизонтальных трубах в диапазоне изменения давлений от 0,42631 до 1,0837 МПа.

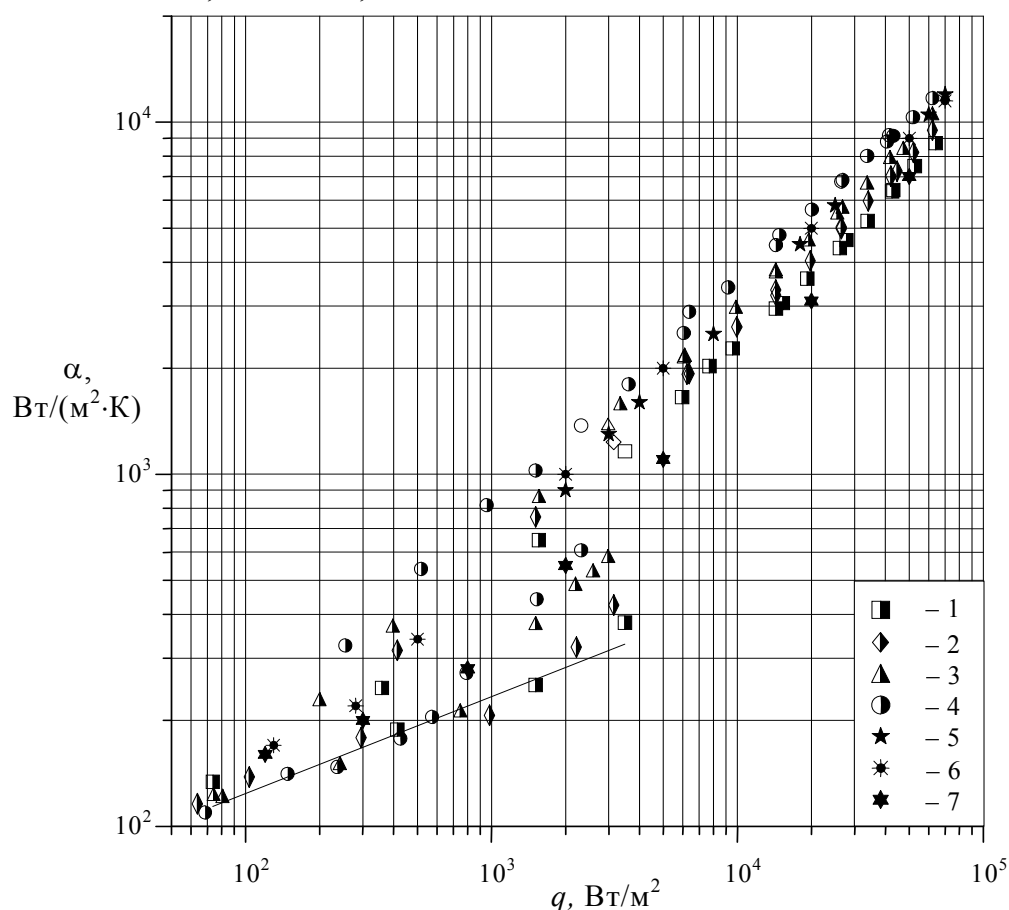


Рис. 2. Зависимость $\alpha=f(q)$ при кипении пропана на гладких горизонтальных трубах: 1 – 4 – экспериментальные данные настоящего исследования (медь, $T_n = 0; 10; 20; 30^{\circ}\text{C}$, соответственно, $D_{\text{тр}}=20$ мм, $R_z \approx 2,2$ мкм); 5 – [8] (сталь 1X18H9T, $T_n = 30^{\circ}\text{C}$, $D_{\text{тр}}=10$ мм); 6 – [9] (сталь Ст 35.8, $T_n = 20,5^{\circ}\text{C}$, $D_{\text{тр}}=88,4$ мм, $R_z \approx 1,2$ мкм); 7 – [9] (сталь Ст 35.8, $T_n = -3,7^{\circ}\text{C}$, $D_{\text{тр}}=88,4$ мм, $R_z \approx 1,2$ мкм); сплошной линией обозначена конвективная область кривой. Светлые символы – начало кипения.

4. Результаты экспериментального исследования и их обсуждение

Экспериментальное исследование влияния плотности теплового потока и 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 $p_n=0,47528\div 1,0837$ МПа ($T_n=0\div 30^\circ\text{C}$).

Экспериментальные кривые кипения, представленные на рис.3, можно разделить на три области: конвективную, переходную (возможно неразвитое кипение) и собственно развитое кипение.

При конвективном теплообмене различие между коэффициентами теплоотдачи для гладкой и поверхности с покрытием невелико. Это связано с тем, что капиллярно-пористая структура представляет собой дополнительное гидравлическое сопротивление, то есть ухудшаются условия отвода жидкости от обогреваемой поверхности. Небольшая разница между коэффициентами теплоотдачи обусловлена высокой теплопроводностью скелета. Следовательно, позитивные факторы (увеличение поверхности теплообмена и высокая теплопроводность покрытия $\lambda_{\text{ск}} > \lambda_{\text{ж}}$) компенсируют негативные (ухудшение условий отвода и перемешивания теплоносителя).

Наличие переходной области, в которой можно получить величины коэффициента теплоотдачи, находящиеся между величинами для развитого и неразвитого пузырькового кипения, наблюдалось как на гладком, так и на некоторых пористых образцах. Для медной технически гладкой горизонтальной трубы эта область лежит в диапазоне $q=800\div 3500$ Вт/м². При дальнейшем повышении тепловой нагрузки ($q > 6000$ Вт/м²) возрастала частота отрыва паровых пузырей, что приводило к образованию двухфазного потока вблизи поверхности. Увеличение плотности центров парообразования приводило к тому, что на устойчивость растущих пузырей начинала оказывать влияние работа соседних центров.

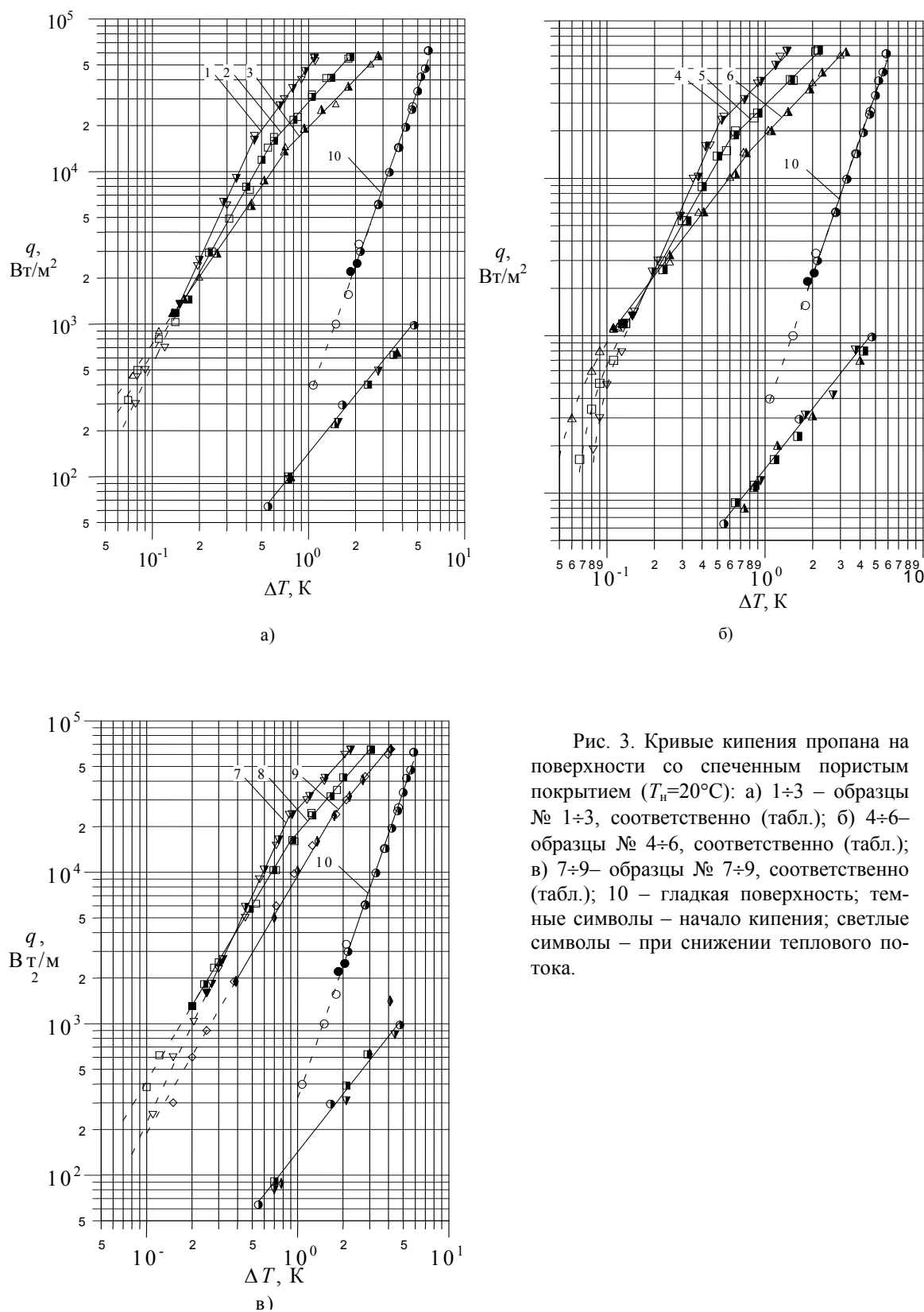
Нанесение пористого покрытия приводило к стабилизации процесса кипения, и переходная область для большинства образцов практически отсутствовала. Однако для структур, состоящих из крупных частиц, с размером пор, значительно превышающим критический диаметр парового зародыша, переходная область имела место. Причем, для верхнего диапазона давлений насыщения вероятность неразвитого кипения была выше. Это объясняется увеличением числа крупных пор, размер которых не отвечает оптимальным условиям для возникновения центров парообразования, а также усилением пульсаций жидкости внутри скелета структуры.

Начало и прекращение кипения $\Delta T_{\text{нк}}$, $q_{\text{нк}}$ и $\Delta T_{\text{пк}}$, $q_{\text{пк}}$ фиксировалось по появлению первых и исчезновению последних пузырей на внешней поверхности пористого покрытия. На образце без покрытия первые центры парообразования появлялись на нижней образующей горизонтальной трубы. При тепловых потоках $q=1700\div 3500$ Вт/м² (в зависимости от давления насыщения) кипение постепенно охватывало всю поверхность образца, температура ее поверхности снижалась. Коэффициенты теплоотдачи приближались к величинам на линии развитого пузырькового кипения. При тепловых потоках $q > 3500$ Вт/м² теплообмен не зависит от направления изменения тепловой нагрузки. Для области развитого пузырькового кипения экспериментальные данные можно описать уравнением:

$$\alpha = A \cdot q^n, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где A – коэффициент пропорциональности, зависящий от T_n , $n=0,68$.

Показатель степени n оставался неизменным и равным 0,68 во всем исследованном диапазоне температур насыщения. Значения A : 0,73 при $T_n=30^\circ\text{C}$; 0,64 при $T_n=20^\circ\text{C}$; 0,57 при $T_n=10^\circ\text{C}$; 0,49 при $T_n=0^\circ\text{C}$.



Для капиллярно-пористых структур с $d_{\text{ч}}=0\div 63$ (при $T_{\text{н}}=0\div 30^{\circ}\text{C}$), $d_{\text{ч}}=63\div 100$ (при $T_{\text{н}}=0\div 20^{\circ}\text{C}$), $d_{\text{ч}}=100\div 160$ (при $T_{\text{н}}=0\div 20^{\circ}\text{C}$) при соотношении $\delta_{\text{ск}}/d_{\text{г}} \geq 11$ наблюдалось взрывное вскипание по всей поверхности образца. Это согласуется с результатами работы [1], авторы которой также наблюдали эффект взрывного вскипания на по-

верхности High Flux, характеристики которой схожи с исследованными экспериментальными образцами. Такое быстрое распространение кипения по поверхности связано, видимо, с высокой проницаемостью покрытия и большим числом пор, размер которых близок к оптимальному при тепловом потоке начала кипения. Активирование первых центров парообразования приводит к быстрому распространению пара в пористой матрице и активации других центров парообразования во всем скелете структуры. Во всех остальных случаях кипение начиналось на верхней образующей трубы.

Анализ кривых кипения (рис. 3) показал, что область развитого пузырькового кипения можно разделить на два участка. 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. В уравнении теплообмена $q=A\cdot\Delta T^n$ показатель степени $n>1$. Коэффициенты теплоотдачи $\alpha=q/\Delta T_c$ 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, либо за счет снижения темпа активации центров парообразования. В уравнении теплообмена $q=A\cdot\Delta T^n$ показатель степени $n\approx 1$. С увеличением теплового потока кривые кипения на гладкой и пористой поверхности сближаются.

Переход от режима I к режиму II определяется по характерному “излому” кривой кипения. Данный вывод подтверждается в работах [2,3]. Значения q^* и ΔT_c^* , соответствующие изменению наклона кривой кипения, зависят от параметров покрытия и давления насыщения в системе. В литературе природа точек излома $\alpha=f(q)$ объясняется различным образом. Одни исследователи [5–7] определяют их как переход от режима кипения с высоким темпом активации центров парообразования на поверхности с капиллярно-пористой структурой к режиму, где прирост количества парогенерирующих пор заметно снижается. При этом даже при больших тепловых нагрузках во втором режиме кипения вплоть до наступления кризиса на стенках капилляров существует испаряющаяся пленка жидкости. Согласно иной точке зрения [2–4] переход от одного режима кипения к другому происходит в момент, когда зона испарения отделяется от поверхности нагрева пленкой пара. 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 $d_c=0\div 63$ и $\delta_{ск}=0,2$ перегиб кривой практически незаметен, а для структуры с $d_c=63\div 100$ и $\delta_{ск}=0,3$ он ярко выражен, так как количество пор, находящихся вблизи максимума функции распределения и отвечающих оптимальным условиям для возникновения центров парообразования, во втором случае почти в полтора раза ниже (рис. 4). Эффективность этих образцов при первом режиме кипения практически одинакова, а различие между коэффициентами теплоотдачи при втором режиме с ростом теплового потока становится существенным. Для образцов с большой толщиной покрытия $d_c=0\div 63$ и $\delta_{ск}=0,5$ 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 $d_c=160\div 200$ и $\delta_{ск}=0,5$ перегиб кривой также незначителен, но теплоотдающая способность в 2–3,5 раза ниже, чем у образцов №1 и №4 (рис. 3). Следовательно, в данном случае, улучшение условий отвода пара вместе с уменьшением количества пор не приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи.

Опытные данные настоящего исследования подтвердили эффективность применения спеченных покрытий. Интенсификация процесса теплообмена наблюдалась во всем диапазоне тепловых нагрузок. Тепловые потоки начала кипения для образцов с оптимальными параметрами покрытий в 2–2,5 раза были ниже, а увеличение коэффициента теплоотдачи достигало 10-кратного по сравнению с гладкой поверхностью.

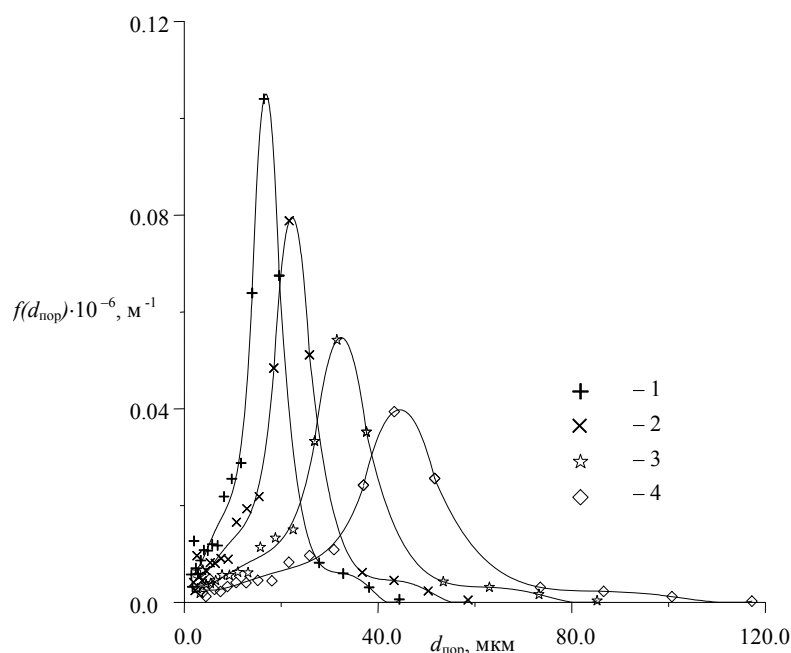


Рис. 4. Экспериментальные данные по исследованию порорас-пределения пористого материала, полученного спеканием свободнасыпанного порошка меди марки ПМС-Н для различных фракций с размером частиц: 1 – $0 \div 63 \text{ мкм}$; 2 – $63 \div 100 \text{ мкм}$; 3 – $100 \div 160 \text{ мкм}$; 4 – $160 \div 200 \text{ мкм}$.

Одним из практических приложений исследования теплообмена при кипении пропана может являться использование результатов при разработке низкотемпературных тепловых труб и термосифонов, применяемых для эффективного охлаждения компонентов электроники. В таких устройствах выделяющий тепло элемент может контактировать с внешней поверхностью тепловой трубы [10], при этом термическое сопротивление контакта охлаждаемого объекта со стенкой тепловой трубы ограничивает возможность отвода тепла. В АНК ИТМО НАНБ предложено охлаждающее устройство, в котором элемент электроники помещается внутри испарителя тепловой трубы или термосифона [11, 12]. Достоинством погружного охлаждения является отсутствие контактного сопротивления между компонентами системы, поскольку поверхность охлаждаемого элемента непосредственно является и поверхностью теплообмена. Наличие на поверхности пористого покрытия позволяет отводить от нее значительные тепловые потоки при низких температурных напорах. Однако к рабочей жидкости, используемой в устройствах погружного типа, предъявляются специфические требования: помимо высоких удельной теплоты парообразования и давления паров насыщения жидкость должна обладать диэлектрическими свойствами. В качестве вакантных жидкостей для такого оборудования можно рассматривать некоторые углеводороды: метан, этан, этилен, пропан, пропилен, протадиеи, бутан и др. Пропан, являясь диэлектрической жидкостью, обладает необходимыми теплофизическими и химическими характеристиками, позволяющими использовать этот углеводород в теплообменниках погружного типа для охлаждения силовых тиристоров, диодов, микросхем и других объектов электроники.

5. Выводы

Нанесение на поверхность нагрева капиллярно-пористого покрытия позволяет во многих случаях значительно снизить перегревы и тепловые потоки начала кипения в большом объеме, стабилизировать процесс кипения и увеличить, тем самым, интенсивность теплоотдачи.

Характер кривой кипения для спеченных медных покрытий определяется толщиной покрытия, пористостью и количеством активных пор, то есть гидравлическим сопротивлением фильтрации пара от зоны испарения к внешней границе покрытия.

Повышение давления насыщения приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи, особенно для первого участка области развитого кипения.

Пропан и другие углеводороды могут быть рекомендованы для использования их в холодильной технике и радиоэлектронной промышленности в качестве уникальных теплоносителей, обладающих рядом достоинств по сравнению с другими жидкостями.

Литература

1. Марто П., Лепер Л. Теплоотдача от структурированной поверхности при кипении диэлектрической жидкости в большом объеме // Теплопередача. – 1982. – Т.104, №2. – С. 72–80.
2. Стырикович М.А., Малышенко С.П., Андрианов А.Б. и др. Особенности кипения на поверхностях с нетеплопроводными пористыми покрытиями // Докл. АН СССР.–1978.–Т.241, №2.–С. 345–348.
3. Стырикович М.А., Малышенко С.П., Андрианов А.Б. и др. Исследование процессов кипения на пористых поверхностях // Теплообмен. VII – Т.6.– Минск: ИТМО АН БССР, 1984.– С. 3–8.
4. Андрианов А.Б., Малышенко С.П. Влияние характеристик пористых покрытий на теплообмен при кипении // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1989.- №1. – С.139–149.
5. Семена М.Г., Гершуни А.Н., Зарипов В.К. Тепловые трубы с металловолокнистыми капиллярными структурами.- Киев: Вища шк., 1984.- 216 с.
6. Нищик А.П. Предельные режимы тепловых труб с металловолокнистыми капиллярными структурами: Дис. ... канд. техн. наук.– Киев, 1985.– 303 с.
7. Семена М.Г., Зарипов В.К., Гершуни А.Н. Исследование закономерностей теплообмена в зоне нагрева тепловых труб с металловолокнистыми капиллярными структурами // ТВТ.– 1982.– Т. 20, №2.– С. 317–322.
8. Клименко А.П., Козицкий В.И. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении пропана // Нефтяная и газовая промышленность. – Киев, 1967. – №1.- С. 40–43.
9. Gorenflo D., Sokol P., Caplanis S. Pool boiling heat transfer from single plain tubes to various hydrocarbons // Int. J. Refrig. – 1990, №13. – P. 286–292.
10. Pat. 4.554.966 USA. Heat Transfer Device / Vasiliev L.L. et al. (USSR). Nov. 26, 1985.
11. А.с. 306320 СССР. Устройство для охлаждения полупроводниковых приборов /Л.Л.Васильев, В.В.Сенин (СССР).- № 1314814/24-6; Оpubл. 11.06.71, Бюл. № 19.
12. Vasiliev L.L., Antukh A.A., Vasiliev L.L. Jr. Electronic cooling system with a loop heat pipe and solid sorption cooler // Preprints of The 11th International Heat Transfer Conference (Tokyo, Japan, 1999). Tokyo: Seikei University, 1999.- V. 1.- P. 54-60.