

Л.Л. Васильев, А.С. Журавлев, А.В. Овсянник,
В.В. Литвиненко, А.В. Шаповалов

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОДВОДА ЖИДКОСТИ К МЕСТАМ ПАРООБРАЗОВАНИЯ НА ТЕПЛООБМЕН В ПОРИСТОМ ТЕЛЕ

Испарительные теплообменные аппараты находят широкое применение во многих отраслях промышленности. В ряде случаев эксплуатация таких устройств осуществляется в условиях малых температурных напоров между теплоотдающей поверхностью и рабочей средой. Интенсификация теплообмена при низких температурных напорах позволяет уменьшить массу и габариты аппаратов. Повышение интенсивности процесса образования паровой фазы при низких температурных напорах и плотностях теплового потока наиболее эффективно реализуется с помощью нанесения на основную теплоотдающую поверхность спеченных медных капиллярно-пористых покрытий. Такие покрытия имеют достаточно хорошую связь со стенкой, прочны и надежны в эксплуатации, обеспечивают высокие теплотехнические характеристики.

Количество тепла, снимаемое с единицы площади поверхности со спеченным пористым покрытием, зависит от характеристик покрытия (открытой пористости, толщины, размера фракции), физических и теплофизических свойств жидкости, условий протекания процесса (давления насыщения, направления изменения теплового потока, уровня жидкости). Исходя из этого, экспериментальное исследование влияния уровня пропана над медной спеченной капиллярно-пористой структурой на интенсивность теплоотдачи при кипении представляет несомненный интерес.

В лаборатории пористых сред Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси исследуются процессы теплообмена при парообразовании в пористых телах. Выполнена серия экспериментов по кипению пропана на поверхности горизонтальной трубы, покрытой медной спеченной капиллярно-пористой структурой. Эксперименты проводились при различных уровнях жидкости относительно образца на специально созданном стенде, позволяющем исследовать процесс в широком диапазоне температур и давлений насыщения. Рабочий участок с опытным образцом размещался в центре цилиндрической части испарительной камеры из нержавеющей стали. Для обеспечения адиабатных условий испарительная камера помещена в термостатируемый бокс. Тепловой поток к теплообменной поверхности подводился с помощью электрического нагревателя, расположенного внутри образца, измерения температуры выполнялись в установившемся режиме. Регистрация и обработка информации производились автоматизированным комплексом, в состав которого входит персональный компьютер. Подробно конструкция стенда и методика исследований описаны в [1]. Компоновка агрегатов стенда внутри термостатируемого бокса показана на рис. 1.

Экспериментальным образцом служила горизонтальная медная труба длиной 100 мм с внешним диаметром 20 мм и толщиной стенок 2 мм. На поверхность теплообмена наносилось пористое покрытие из спеченного порошка меди марки ПМС-Н. В данной статье рассматриваются результаты, полученные на образце с толщиной пористого слоя 0.3 мм из частиц диаметром 0.063-0.1 мм, пористость покрытия составляла 50-55 %.

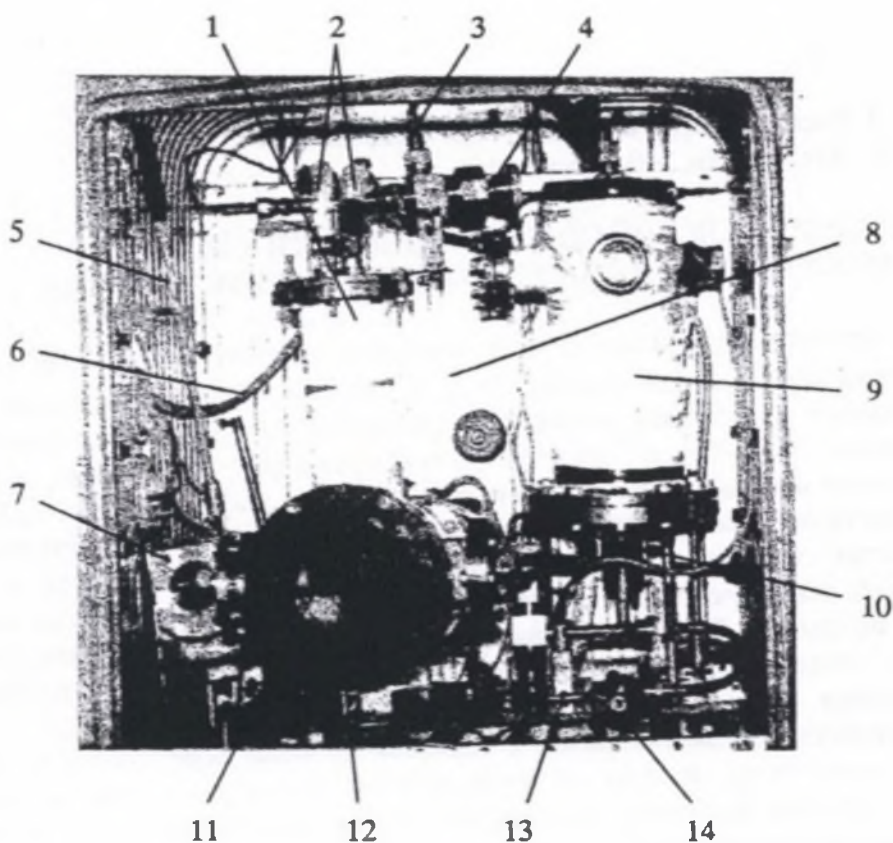


Рис. 1. Компоновка агрегатов стенда внутри термостатируемого бокса: 1 – рабочая камера, 2 – шланги подвода и отвода охлаждающей жидкости, 3 – трубопровод к вакуумному насосу, 4 – вакуумный кран, 5 – штанга крепления датчика индикатора горючих газов, 6 – жгут термопарных проводов, 7 – зеркало бокового обзора, 8 – канал для прокачки термостатирующей жидкости, 9 – вспомогательный резервуар, 10 – электрокабель основного нагревателя, 11 – экспериментальный образец, 12 – иллюминатор для наблюдений и фотосъемки процесса, 13 – заправочный штуцер, 14 – вентиль

Эксперименты проводились при температуре паров насыщения $T_n = 20^\circ\text{C}$, давлении $p_n = 8.4 \text{ бар} = 8.4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ($p^* = 0.197$) в диапазоне тепловых нагрузок $q = 0.03 - 78 \text{ кВт/м}^2$. Высота уровня жидкости h относительно нижней образующей трубы (рис. 2) менялась от 0 до 75 мм.

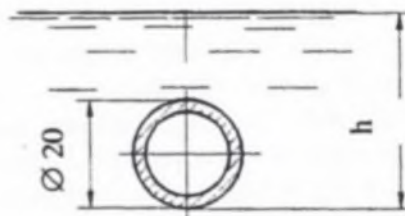


Рис. 2. Уровень пропана относительно исследуемого образца

Перед началом исследования были выполнены тарировочные опыты на гладкой медной трубе. Полученные результаты (рис. 3, а) удовлетворительно согласуются с данными, опубликованными в литературе [2, 3].

На рис. 3 представлены кривые кипения пропана в большом объеме. Высота уровня жидкости над верхней образующей трубы при $h=75, 60, 40$ мм достаточно велика по сравнению с отрывным диаметром парового пузыря. В исследованном диапазоне изменения тепловой нагрузки можно определить три характерных режима теплообмена: конвективный ($q < 1$ кВт/м²), переходный ($1 < q < 9$ кВт/м²) и развитого кипения по всей поверхности капиллярно-пористой структуры ($q > 9$ кВт/м²). Границы существования режимов для вышеуказанных значений h совпадали. Переходный режим характеризовался изменением угла наклона кривых кипения (рис. 3, б) при появлении первых паровых пузырей диаметром $d \sim 0.1$ мм, выходящих из устья микропор на верхней образующей образца в объем жидкости. По мере увеличения плотности теплового потока область парообразования распространялась на всю поверхность трубы, при этом уменьшался перепад температур между поверхностью теплообмена и жидкостью за счет падения среднего перегрева стенки образца $\Delta T = T_{\text{г}} - T_{\text{ж}}$ (рис. 3, б). При снижении тепловой нагрузки имел место гистерезис кривых – область развитого кипения распространялась на существенно более низкие значения q . Вид гистерезисной петли не зависел от уровня жидкости.

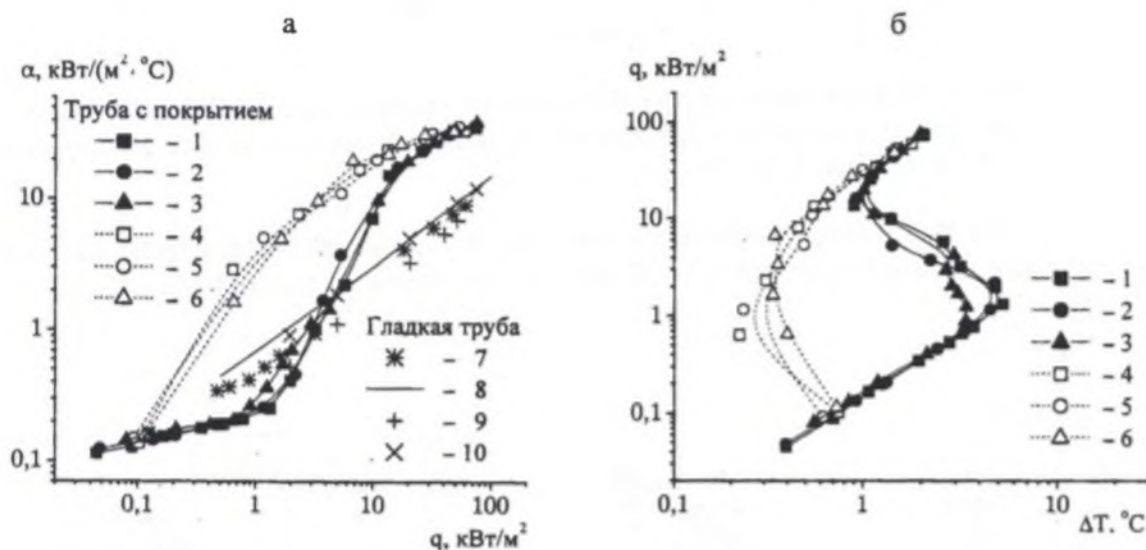


Рис. 3. Результаты исследования теплоотдачи при кипении пропана на горизонтальной трубе в большом объеме: 1-3 – при увеличении тепловой нагрузки; $T_{\text{н}}=20$ °С; 4-6 – при снижении тепловой нагрузки, $T_{\text{н}}=20$ °С; 1, 4 – $h=75$ мм; 2, 5 – 60 мм; 3, 6 – 40 мм; 7 – данные тарировочного эксперимента, медь, $D=20$ мм, $T_{\text{н}}=20$ °С; 8 – сталь 1X18H9T, $D=15$ мм, $T_{\text{н}}=30$ °С [2]; 9, 10 – малоуглеродистая сталь St35.8, $D=88.4$ мм [3], 9 – $T_{\text{н}}=-3.7$ °С, 10 – 27.5 °С

Характеристики теплообмена при уровнях пропана 24 и 22 мм, когда высота слоя жидкости над верхней образующей сопоставима с отрывным диаметром пузыря, представлены на рис. 4. В этих условиях имели место более высокие значения коэффициентов теплоотдачи (рис. 4, а) и меньшие (на 2-3 °С) перегревы поверхности

(рис. 4, б) в переходной области кипения. Первые паровые пузыри наблюдались на верхней образующей, их появление зафиксировано при более низких тепловых нагрузках. В режиме развитого кипения кривые, полученные при $h=22-75$ мм, сливаются.

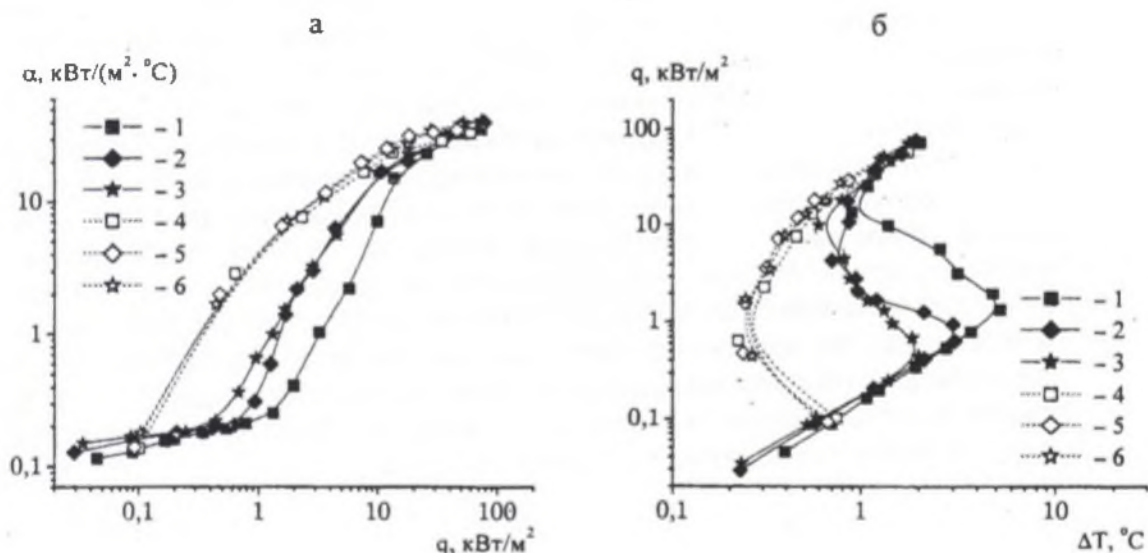


Рис. 4. Кривые кипения при пониженных уровнях пропана, $T_n = 20^\circ\text{C}$: 1-3 – при увеличении тепловой нагрузки; 4-6 – при снижении тепловой нагрузки; 1, 4 – $h = 75$ мм; 2, 5 – 24; 3-6 – 22

На рис. 5 представлены результаты исследования теплоотдачи при кипении пропана на затопленном ($h = 75; 20$ мм) и частично затопленном ($h = 15; 10; 5; 0$ мм) образце.

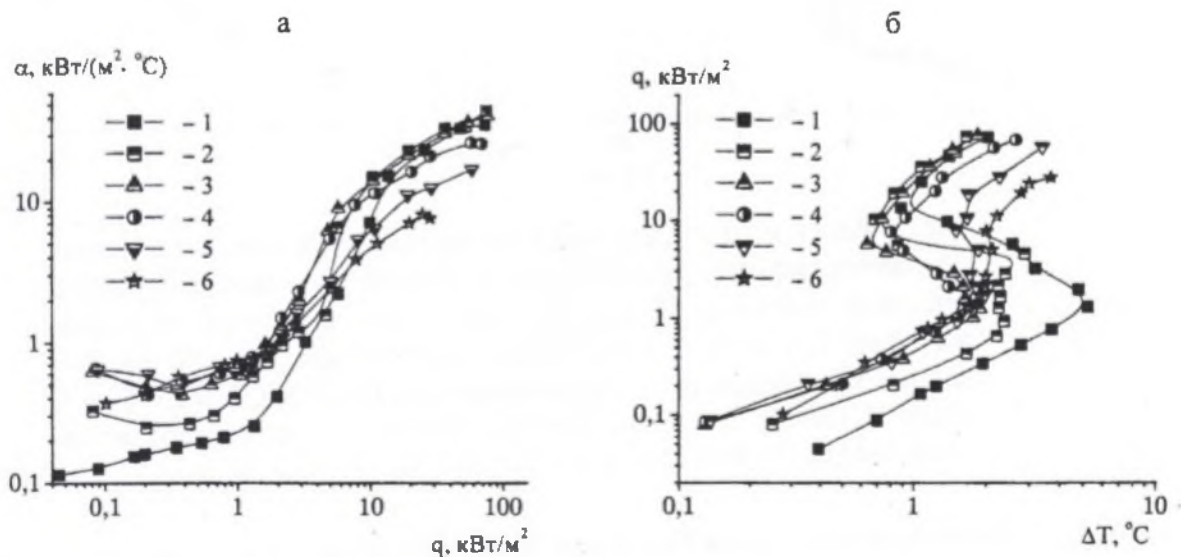


Рис. 5. Характеристики кипения пропана на затопленном и частично затопленном образце, $T_n = 20^\circ\text{C}$: 1 – $h = 75$ мм; 2 – 20; 3 – 15; 4 – 10; 5 – 5 мм; 6 – 0

Полученные данные показывают, что в области невысоких тепловых нагрузок понижение уровня жидкости способствовало интенсификации теплоотдачи. Это объясняется различиями в механизмах теплообмена при парообразовании внутри пористого слоя в условиях большого объема и при подсосе жидкости капиллярными силами.

В литературе предложено несколько моделей теплообмена при парообразовании в пористой структуре [4-8]. В большинстве из них капиллярное тело рассматривается как система из крупных и мелких пор, в которой мелкие поры обеспечивают подвод жидкости к зонам образования паровой фазы, а крупные служат пароотводящими каналами. В соответствии с некоторыми моделями [7, 8] кипения в большом объеме поверхности паровых каналов постоянно смочены пленкой жидкости, ухудшающей условия для выхода пара.

Интенсификацию теплоотдачи при уровне жидкости ниже верхней образующей трубы можно объяснить отсутствием пленки жидкости в макропорах незатопленного участка. Жидкая фаза к местам фазового перехода подводится с помощью капиллярных сил, парообразование происходит в устьях микропор на выходе в пароотводящие каналы, термическое и гидродинамическое сопротивление слоя жидкости над пористой поверхностью отсутствует. В области тепловых нагрузок $q=0.1-1.5 \text{ кВт/м}^2$ наблюдалось увеличение коэффициентов теплоотдачи в 1.5 раза при уровне жидкости на высоте верхней образующей образца ($h \sim 20 \text{ мм}$), в 2.5-3 раза для $h=15-0 \text{ мм}$. Для уровней жидкости 20 и 15 мм в области развитого кипения коэффициенты α имеют близкие значения. Снижение уровня h до 10 мм относительно нижней образующей трубы отрицательно сказывается на интенсивности теплоотдачи при тепловых нагрузках выше $1.5-2 \text{ кВт/м}^2$. Это связано с ростом среднего перегрева теплоотдающей поверхности (рис. 5, б) вследствие ухудшения условий подвода жидкости к местам парообразования и осушения капилляров.

З а к л ю ч е н и е

Как показывают результаты проведенного исследования, вследствие отличия в механизмах теплообмена при разных способах подвода жидкости к зонам парообразования коэффициенты теплоотдачи на частично затопленной горизонтальной трубе при тепловых нагрузках до 100 кВт/м^2 в зависимости от уровня погружения объекта в жидкость могут быть в несколько раз выше, чем при кипении в большом объеме.

Практическое значение полученных данных состоит в том, что их учет позволяет повысить эффективность теплообменной аппаратуры испарительного типа при уменьшении ее габаритов и массы.

О б о з н а ч е н и я

D – диаметр, мм; h – высота уровня жидкости относительно нижней образующей трубы, мм; p – давление, бар; $p_{кр}$ – критическое давление, бар; p^* – относительное давление, $p^* = p/p_{кр}$; Q – подведенная тепловая мощность, кВт; q – плотность теплового потока, кВт/м^2 ; $T_{ж}$ – температура жидкости, °С; $T_{н}$ – температура насыщения, °С; $T_{т}$ – температура наружной поверхности трубы, °С; ΔT – разность температур, °С; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Л и т е р а т у р а

1. Васильев Л.Л., Хроленок В.В., Журавлёв А.С. Интенсификация теплообмена при кипении пропана на горизонтальных трубах // Тепло- и массоперенос – 97. Минск, 1997. С. 9-14. (Сб. науч. тр. / ИТМО им. А.В. Лыкова НАНБ).
2. Клименко А.П., Козицкий В.И. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении пропана // Нефтяная и газовая пр-сть. 1967. № 1. С. 40-43.
3. Gorenflo D., Blein P., Rott W. et al. Pool boiling heat transfer from GEWA-T-x finned tube to propane and propylene // Advanced in Pool Boiling Heat Transfer: Eurotherm N 8. Proc. of Int. Seminar, Paderborn, F.R.G., 1989. P. 116-126.
4. Полонский В.С., Зуйков А.С., Леонтьев А.И., Стырикович М.А. Модель процесса концентрирования при кипении в капиллярно-пористых структурах // Докл. АН СССР. 1978. Т. 241, № 3. С. 579-583.
5. Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Испарение и конденсация в тепловых трубах. М.: Наука, 1989. 112 с.
6. Webb R.L. Nucleate boiling on porous coated surfaces // Heat Transfer Engineering. 1983. Vol. 4. N 3-4. 1983. P. 71-82.
7. Smirnov H.F. Afanasiev B.A., Poniewski M.E. Boiling in capillary-porous structures // Proc. Int. Conf. Heat Transfer with Change of Phase, Kielce, Poland. Part II. 1996. P. 197-220.
8. Shaubach R.M., Dussinger P.M., Bogart J.E. Boiling in heat pipe evaporator wick structures // Proc. 7th Int. Heat Pipe Conf., Minsk, Belarus, 1990. P. 1-15.