

Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси, Минск (1)

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Беларусь (2)

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПАРООБРАЗОВАНИИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ И НА ЧАСТИЧНО ЗАТОПЛЕННОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ С КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫМ ПОКРЫТИЕМ

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при парообразовании на поверхности медной горизонтальной трубы со спеченным капиллярно-пористым покрытием из медного порошка, полностью либо частично погруженной в объем сжиженного пропана. Описаны конструкция экспериментального стенда и методика проведения исследований. Рассмотрено влияние условий подвода жидкости в зоны генерации паровой фазы, определяющих различия в механизмах образования пара, на интенсивность теплообмена. Установлено, что при умеренных тепловых нагрузках (до 100 кВт/м²) интенсивность теплообмена при парообразовании на частично затопленной структуре может быть выше, чем при кипении в большом объеме.

1. ВВЕДЕНИЕ

Теплообменные процессы при испарении и кипении широко используются в энергетических установках, холодильной технике, химическом оборудовании, объектах электроники. Одним из способов интенсификации теплоотдачи в испарительных теплообменниках является нанесение на теплоотдающую поверхность капиллярно-пористого покрытия. В качестве теплоносителей и хладагентов используются различные жидкости. Теплофизические характеристики и химические свойства позволяют рассматривать углеводороды как перспективные рабочие жидкости.

Для разработки отвечающих современным требованиям энергетических машин и другой аппаратуры необходимо изучить закономерности теплообмена при парообразовании на поверхностях с пористым покрытием в различных условиях. В лаборатории пористых сред Института тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси (Минск) проведено экспериментальное исследование теплообмена при кипении пропана на одиночной горизонтальной медной трубе, покрытой спеченной капиллярно-пористой структурой из того же материала (толщина покрытия 0,3 мм, пористость 50 ÷ 55 %). Эксперименты проводились в большом объеме и на частично затопленном образце при различных уровнях жидкости относительно исследуемого образца.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

2.1. Экспериментальный стенд

Эксперименты выполнялись на специально созданном стенде, позволяющем проводить исследования в широком диапазоне температур и давлений насыщения. Рабочий участок с исследуемым образцом размещался в центре цилиндрической части испарительной камеры из нержавеющей стали. Три иллюминатора позволяли проводить визуальные наблюдения и фотографирование процесса. Состояние насыщения жидкости обеспечивалось изменением производительности конденсатора. Для обеспечения адиабатных условий испарительная камера помещена в термостатируемый бокс. Температура в боксе поддерживалась равной температуре в испарительной камере при помощи контуров нагрева и охлаждения и высокой степени теплоизоляции корпуса бокса. Тепловой поток к теплообменной поверхности подводился с помощью электрического нагревателя, расположенного внутри исследуемого образца. Температура измерялась медь-константановыми термопарами. Условия насыщения контролировались четырьмя термопарами, размещенными в жидкости и паровом пространстве, и образцовым манометром. Перепад температуры между поверхностью нагрева и жидкостью измерялся четырьмя дифференциальными термопарами. Регистрация и обработка информации производились автоматизированным комплексом, в состав которого входили коммутатор измерительных сигналов Ф7078К, цифровой вольтметр Ц68000 и ПЭВМ.

Подробное описание установки и методики проведения экспериментов приведено в [1, 2].

2.2. Исследуемый образец

Экспериментальным образцом служила горизонтальная труба из меди длиной 100 мм, внешним диаметром 20 мм с толщиной стенок 2 мм. На внешней поверхности трубы через 90° по азимуту фрезеровались продольные канавки шириной 0,4 мм, глубиной 0,8 мм и длиной 30, 50, 70 и 50 мм. Спаи термопар зачеканивались в стенку трубы. Проводники, покрытые лаковой и шелковой

изоляция. укладывались в канавки и сверху закрывались медным проводом диаметром 0,5 мм.

Капиллярно-пористое покрытие спекалось из порошка меди марки ПМС-Н в среде аргона. Толщина пористого слоя рассматриваемого образца составляла 0,3 мм, пористость – 50-55 %, диаметр частиц – (0,063-0,1) мм.

2.3. Методика экспериментов

Температурные измерения выполнялись при граничных условиях второго рода в установившемся режиме. Коэффициент теплоотдачи α определялся по отношению к площади внешней поверхности трубы без покрытия $F_{г.н}$:

$$\alpha = \frac{Q}{F_{г.н} \Delta T} = \frac{q}{T_r - T_{ж}} \quad (1)$$

Предварительно были проведены тарировочные опыты на гладкой медной трубе. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными, опубликованными в литературе [3, 4].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились при температуре 20 °С, $p = 8.4 \text{ бар} = 8.4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ($p^* = 0.197$), в диапазоне изменения тепловых нагрузок $q = (0.03 \div 78) \text{ кВт/м}^2$. Высота уровня пропана h относительно нижней образующей трубы менялась в пределах (0 ÷ 75) мм.

На рис. 1 представлены результаты при кипении пропана в большом объеме. В исследованном диапазоне изменения тепловой нагрузки можно выделить два характерных режима теплообмена: переходный режим ($q < 9 \text{ кВт/м}^2$) и режим развитого кипения ($q > 9 \text{ кВт/м}^2$). Границы существования режимов в данных условиях совпадали во всем диапазоне значений h . Начало переходного режима при появлении первых паровых пузырей диаметром около 0.1 мм, появляющихся на верхней образующей образца, характеризуется изменением угла наклона кривых.

По мере увеличения плотности теплового потока область парообразования распространялась на всю поверхность трубы, при этом происходило уменьшение перепада температур между поверхностью теплоотдачи и жидкостью. При снижении тепловой нагрузки наблюдалось явление гистерезиса – область развитого режима кипения распространялась на существенно более низкие значения q . Вид гистерезисной петли не зависел от уровня жидкости.

Теплообменные характеристики процесса кипения в объеме при разных уровнях жидкости относительно образца представлены на рис. 2. Можно отметить, что при уровне 2-5 мм над верхней образующей интенсивность теплоотдачи

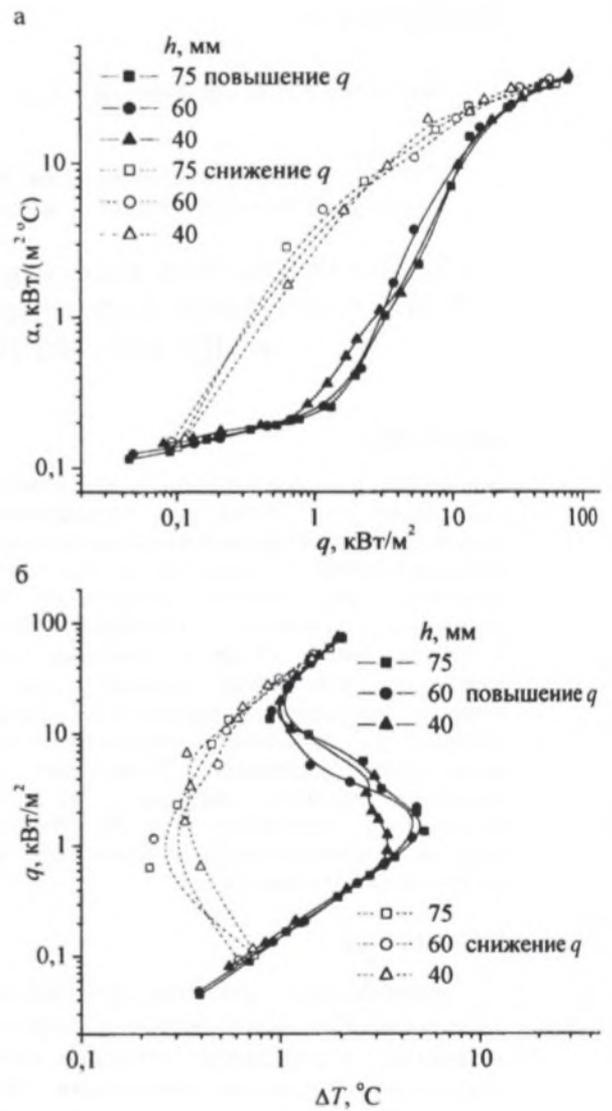


Рис. 1. Характеристики теплообмена при кипении пропана в большом объеме: а) $\alpha = f(q)$; б) $q = f(\Delta T)$

выше, чем при тех же значениях тепловых нагрузок в условиях большого объема.

Появление первых паровых пузырей малого диаметра на верхней части поверхности образца наблюдалось при более низких тепловых нагрузках. В сравнении с одинаковыми значениями q в большом объеме при $h \sim 22 \text{ мм}$ перегревы, соответствующие началу выхода паровой фазы из пор, были меньше на $2.5 \div 3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Сопоставление характеристик теплообмена при кипении пропана в большом объеме и на частично затопленном образце при разных уровнях жидкости приведено на рис. 3. Кривые показывают, что в области низких тепловых нагрузок понижение уровня жидкости способствовало интенсификации теплообмена. Это объясняется различиями в механизмах теплообмена при парообразовании внутри пористого слоя в условиях большого объема и при подсосе жидкости капиллярными силами.

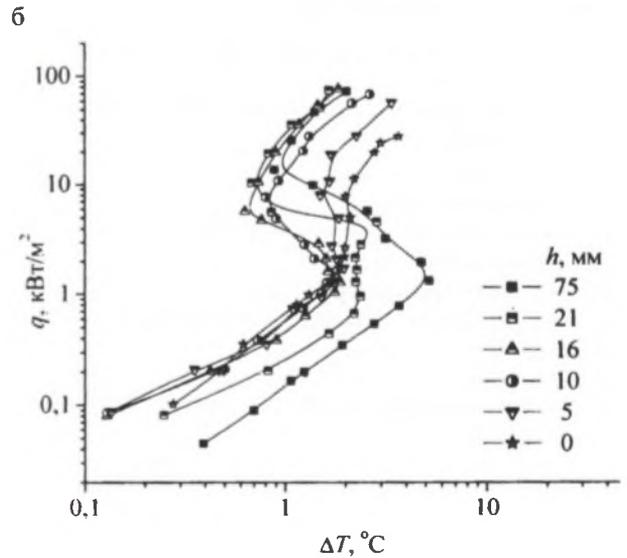
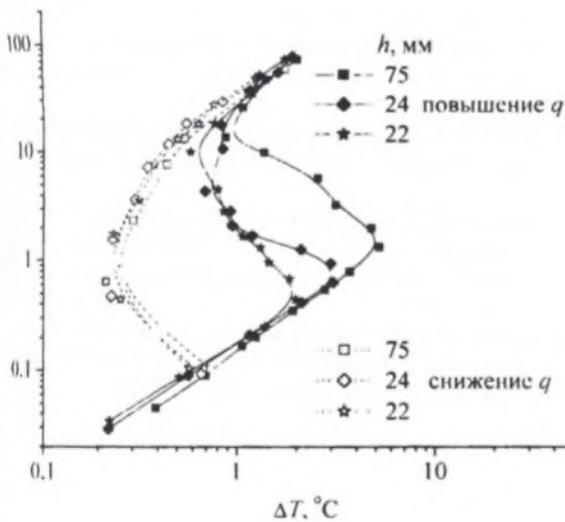
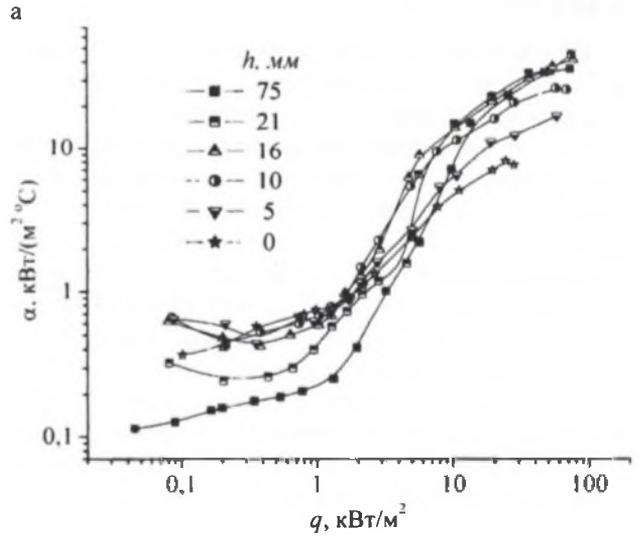
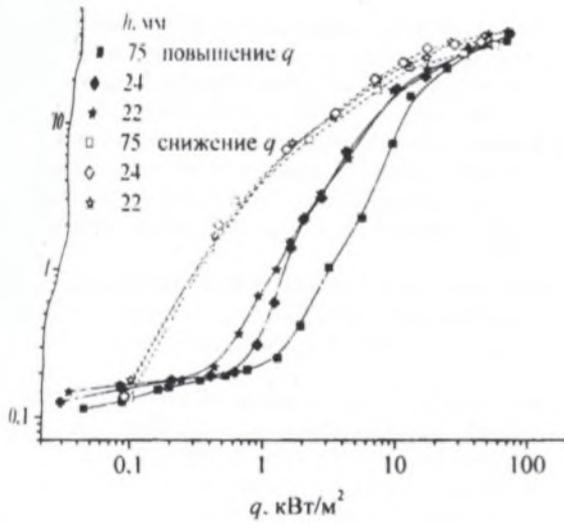


Рис. 2. Кривые кипения пропана при значениях $h = 75; 24; 22$ мм: а) $\alpha = f(q)$; б) $q = f(\Delta T)$

Рис. 3. Характеристики кипения пропана на затопленном ($h = 75$ мм) и частично затопленном образце ($h = 21, 16, 10, 5, 0$ мм): а) $\alpha = f(q)$; б) $q = f(\Delta T)$

Создание универсальной модели теплообмена при парообразовании в пористой структуре едва ли возможно. В настоящее время в литературе описано несколько моделей [5-9]. Пористая структура рассматривается как система из крупных и мелких пор, в которой крупные поры выполняют функции каналов для выхода образующегося пара, а мелкие обеспечивают подвод жидкости к зонам образования паровой фазы. В соответствии с некоторыми моделями [8, 9] на поверхности паровых каналов постоянно сохраняется пленка жидкости, обуславливающая гидравлическое сопротивление выходу пара. При уровне жидкости ниже верхней образующей трубы в макропорах незатопленного участка пленка жидкости отсутствует, испарение происходит в устьях микропор на выходе в паропроводящие каналы. К местам парообразования жидкость подводится с помощью капиллярных сил, термическое и гидродинамическое сопротивление слоя жидкости над пористой поверхностью отсутствует.

В определенном диапазоне тепловых нагрузок количество менисков в незатопленной части покрытия, с поверхности которых происходит испарение жидкости, автоматически увеличивается пропорционально росту плотности теплового потока.

В области тепловых нагрузок $q = (0.1 \div 1.5)$ кВт/м² наблюдалось увеличение коэффициентов теплоотдачи: в 1.5 раза при уровне жидкости на высоте верхней образующей образца ($h \sim 21$ мм); в 2.5-3 раза для $h = 16, 10, 5, 0$ мм. Близкие значения α и q в области развитого кипения характерны для уровней $h = 21$ и 16 мм. Снижение уровня жидкости до 10 мм относительно нижней образующей образца отрицательно сказывается на интенсивности теплоотдачи при более высоких тепловых нагрузках. Это связано с ростом среднего перегрева теплоотдающей поверхности, что является следствием ухудшения условий подвода жидкости в каналы пористой структуры капиллярными силами.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты указывают на различие в механизмах теплоотдачи при кипении на поверхности с пористым покрытием в большом объеме и при подводе жидкой фазы к зонам парообразования с помощью капиллярных сил, вследствие чего при тепловых нагрузках до 100 кВт/м² интенсивность теплообмена при парообразовании на частично затопленной структуре может быть выше, чем при кипении в большом объеме. Это обстоятельство может иметь важное практическое значение при разработке испарительного теплообменной аппаратуры, поскольку позволяет улучшить массогабаритные характеристики создаваемого оборудования и повысить его эффективность.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

НАН – сокращенное наименование Национальной академии наук:

h — высота уровня жидкости относительно нижней образующей;

p — давление, Н / м²;

Q — тепловой поток, кВт;

q — плотность теплового потока, кВт/м²;

T — температура, °С, К;

ΔT — перепад температур, °С, К;

α — коэффициент теплоотдачи, кВт/(м²·К).

Индексы:

ж — жидкость;

кр — порядковый номер орта системы координат;

т — труба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев Л.Л., Хроленок В.В., Журавлёв А.С.** Интенсификация теплообмена при кипении пропана на горизонтальных трубах // Тепло- и массоперенос - 97. Минск: АНК ИТМО НАНБ, 1997. С. 9-14.
2. **Vasiliev L.L., Khrolenok V.V., Zhuravlyov A.S.** Intensification of heat transfer at propane pool boiling on single horizontal tubes // Proc. of 3rd Int. Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Minsk, Belarus, 1997". P. 96-101.
3. **Клименко А.П., Козицкий В.И.** Экспериментальное исследование теплообмена при кипении пропана // Нефтяная и газовая промышленность. № 1. 1967. С. 40 - 43.
4. **Gorenflo D., Sokol P., Caplanis S.** Pool boiling heat transfer from single plain tubes to various hydrocarbons. // Int. J. Refrig. N 13. 1990. P. 286 - 292.
5. **Модель** процесса концентрирования при кипении в капиллярно-пористых структурах / В.С. Полонский, А.С. Зуйков, А.И. Леонтьев, М.А. Стырикович // Доклады АН СССР. 1978. Т. 241. № 3. С. 579-583.
6. **Ковалев С.А., Соловьев С.Л.** Испарение и конденсация в тепловых трубах. М.: Наука, 1989. 112 с.
7. **Webb R.L.** Nucleate boiling on porous coated surfaces // Heat Transfer Engineering. V. 4. Nos. 3-4. 1983. P. 71-82.
8. **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.
9. **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.