

тәуелділігі анықталды.

### Қолданылған әдебиеттер тізімі

- 1 К. Кусаиынов, А.Ж.Тлеубергенова «Электрогидроимпульстік әдіспен Шұбаркөл кен орнынан алынған сулы-көмірлі отынды жағу процесін зерттеу». Бөкетов оқулары-2014: магистранттар және студенттерінің ғылыми-тәжірибелік конференциясының материалдары. – Қарағанды, 2014. – Б. 164-168.
- 2 Мурко, В. И. Технологии получения и сжигания топливных водоугольных суспензий из монгольских бурых углей / В. И. Мурко, В. И. Федяев, М. П. Баранова и др. // Энергетик. – 2011. – № 4. – С. 35–39.

УДК 536.24

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА НА ПОРИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДАГЕНТОВ

**Макеева Екатерина Николаевна**

*[makeeva.ekaterina85@mail.ru](mailto:makeeva.ekaterina85@mail.ru)*

Старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь  
Научный руководитель – А.В. Овсянник

Эффективным способом интенсификации теплоотдачи при малых плотностях тепловых потоков и низких температурных напорах является применение пористых покрытий. Существуют несколько способов нанесения данных покрытий: спекание металлического порошка или волокон, газотермическое металлизационное напыление, электрохимическое осаждение, покрытие металлическими сетками.

В области низких температурных напоров наибольшей интенсивностью обладают покрытия из спеченных медных порошков и поверхности с регулярной микрогеометрией. Одними из перспективных капиллярно-пористых покрытий теплоотдающей поверхности на данный момент признаны спеченные высокотеплопроводные порошковые капиллярно-пористые структуры. К основным достоинствам таких структур относят технологичность изготовления, высокие прочностные свойства, относительно невысокую стоимость, хорошее сочетание капиллярных свойств и высокой эффективной теплопроводности, возможность варьирования в широких пределах структурных параметров. Важным вопросом при проектировании компактных испарителей с капиллярно-пористыми покрытиями является определение предельных режимов работы устройства при больших тепловых потоках, подводимых к поверхности. При таких условиях наблюдается интенсивное парообразование внутри капиллярно-пористого слоя с формированием прослойки пара внутри покрытия и вытеснением жидкости за пределы слоя [1].

Степень влияния размера пор на интенсивность теплоотдачи определяется:

- типом пористого покрытия (капиллярными свойствами и гидравлическим сопротивлением фильтрации пара);
- функцией распределения пор по размерам (количество и размером возможных центров парообразования);
- физическими свойствами жидкости (возможностью возникновения центров парообразования в порах данных размеров).

Рассмотрим влияние толщины и пористости капиллярной структуры на интенсивность теплообмена при кипении. Для относительно толстых капиллярных слоев характерна интенсификация теплоотдачи лишь в области малых тепловых потоков. Это объясняется взаимодействием двух факторов, определяющих теплоотдачу от пористого покрытия. Первый фактор – пористая матрица облегчает прогрев пограничного слоя до температуры

начала кипения. Именно поэтому в области малых тепловых потоков покрытия с пористостью 60% оказываются эффективнее в несколько раз по сравнению с высокопористыми. Второй фактор – отвод пара, который затруднен наличием каркаса в зоне парообразования. Из-за этого при  $q > 70$  кВт/м<sup>2</sup> более эффективными оказываются высокопористые покрытия или с малой толщиной слоя. Для пористых слоев, изготовленных из частиц одинакового размера, существует оптимальная толщина покрытия, позволяющая интенсифицировать теплообмен в более широком диапазоне тепловых потоков. Для покрытий из меди нанесенных на медную подложку она составляет приблизительно четыре диаметра частиц. Толщина покрытия, обеспечивающая существенное увеличение коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока, также должна составлять (3-5) диаметров частиц. Дополнительное увеличение интенсивности теплоотдачи может быть достигнуто путем использования анизотропных покрытий с уменьшенным гидравлическим сопротивлением выходу пара в направлении, нормальном к поверхности нагрева.

Таким образом, интенсификация теплоотдачи при кипении на поверхности с пористым покрытием зависит от ряда факторов: физических свойств жидкости, типа покрытия и его параметров (толщины, пористости, радиуса пор, ориентации капиллярных каналов, материала покрытия, термического контакта между частицами и поверхностью и др.), плотности теплового потока и температурного напора. В области низких температурных напоров (соответственно низких плотностей теплового потока) особенно высокой эффективностью обладают покрытия из спеченных медных порошков. С увеличением теплового потока приблизительно равную с ними эффективность обеспечивают покрытия, полученные газотермическим, электродуговым металлизационным напылением. На основании экспериментальных данных разных авторов можно сделать вывод о том, что наибольшая интенсификация теплоотдачи для пористых металлических покрытий достигается при толщине структуры составляющей 3-6 диаметров частиц и пористости 40-60%. А оптимальный размер частиц в значительной мере определяется физическими свойствами жидкости, которые изменяются с изменением давления в системе [1].

Имеющиеся в литературе опытные данные по кипению различных жидкостей на поверхностях с капиллярно-пористой структурой не дают возможности однозначно определить характер влияния давления на теплообмен. Такое качественное различие влияния давления можно объяснить: различием областей рабочих давлений; отличием физических свойств теплоносителей; изменением в значительном диапазоне теплопроводности скелета структуры; многообразием используемых типов покрытий и их геометрическими характеристиками.

Известно, что степень влияния давления на интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхностях с пористым покрытием существенно зависит от плотности теплового потока. Снижение степени влияния давления на интенсивность теплоотдачи с ростом  $q$  отмечено в при кипении фреонов на напыленных покрытиях. При низких тепловых потоках количество центров парообразования на капиллярной структуре и сопротивление двухфазному потоку будут незначительны, но с увеличением давления в системе факторы приращения кипения (увеличения количества работающих пор) являются преобладающими по сравнению с ослабляющими факторами, и показатели теплоотдачи улучшаются. При высоких тепловых потоках большинство потенциальных центров парообразования являются активными, и скорость нарастания количества новых центров уменьшается. Следовательно, преобладание положительных факторов будет постепенно уменьшаться с увеличением давления в системе и кривые кипения сближаются.

Характер влияния давления зависит и от физических свойств жидкости, которые оказывают влияние и на элементарные процессы при кипении на пористых поверхностях: динамику роста и отрыва пузырей, образование и ликвидацию паровых и жидкостных пленок, процессов пробивания пористых покрытий паром, соответствующих началу кипения; от вида покрытия. Влияние давления и других факторов на интенсивность теплообмена при кипении озонобезопасных хладагентов на поверхностях со спеченным

капиллярно-пористым покрытием до настоящего времени не исследованы, поэтому возникает необходимость в экспериментальном изучении процесса кипения озонобезопасных хладагентов на спеченных пористых покрытиях в условия разных давлений насыщения.

При достижении определенной плотности теплового потока (при которой происходит отрыв паровых пузырей) от теплоотдающей поверхности отрывается большое количество паровых пузырей одинакового размера, отводя от поверхности большое количество теплоты и уменьшая перегрев стенки.

Постоянство перегрева стенки при разных тепловых потоках определяется соответствующим изменением плотности пузырьков пара на поверхности нагрева. Так как активация других пузырьков в структуре в равной мере возможна в любом месте поверхности, новые пузырьки формируются при том же перегреве поверхности. Темп активации новых пузырьков пара должен быть пропорциональным изменению плотности теплового потока, чтобы исключить дополнительный перегрев стенки. Это обеспечивает независимость перегрева стенки от теплового потока. В соответствии с этим замедление роста линии раздела (уменьшение количества активных центров парообразования), связанное с увеличением плотности пузырьков и их ростом, уменьшает термическое сопротивление, таким образом, обуславливая постоянный перегрев стенки [2].

Исходя из физических представлений и подходов к пониманию процессов кипения в [3] была предложена приближенная физическая модель теплообмена при кипении на поверхностях, покрытых капиллярно-пористыми структурами, согласно которой реальная пористая структура (рис. 1а) заменяется идеализированной; последняя состоит из ряда непрерывно функционирующих парогенерирующих пор правильной геометрической формы и парового пространства, целиком заполненного жидкостью (рис. 1б).

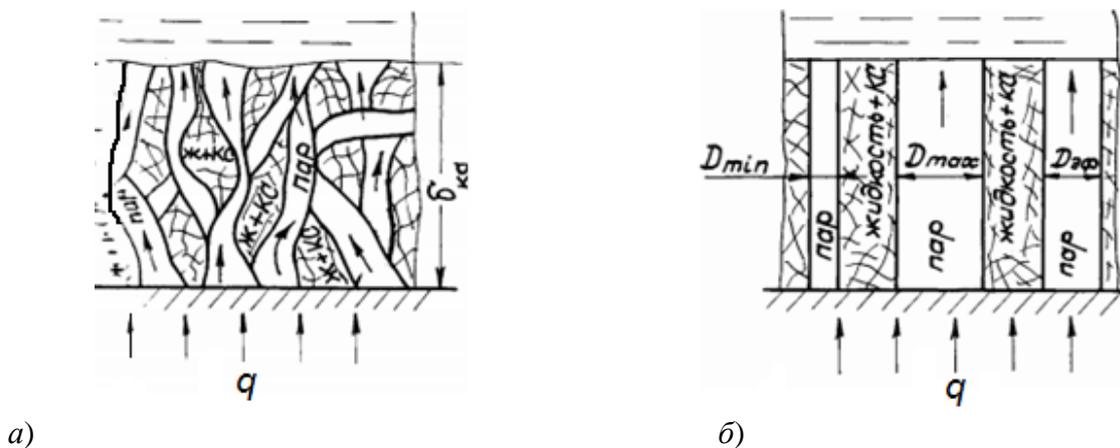


Рисунок 1 – Схема процесса парообразования и теплообмена на поверхности, покрытой капиллярно-пористой структурой, в условиях свободного движения жидкости: а – реальные условия контактного теплообмена; б – идеализированные условия приближенной физической модели

При организации процесса кипения на теплоотдающей поверхности большое значение имеет величина перегрева поверхности, при которой начинается развитое пузырьковое кипение и величина перегрева поверхности, при которой начинается ее «запаривание». Чем больше разность между этими двумя величинами, тем больше диапазон плотности теплового потока, в котором теплоотдающая поверхность будет работать с наибольшей интенсивностью и наоборот. Большое влияние на перегрев поверхности при кипении имеют ее геометрические параметры и, в частности, толщина капиллярно-пористого слоя.

В настоящей работе представлены результаты исследования теплообмена при кипении фреонов R407с, R404а, R410а на трубках с капиллярно-пористым покрытием.

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальной установке в условиях большого объема при давлениях насыщения  $p_n=0,9 - 1,4$  МПа и плотностях теплового потока  $q = 5 - 35$  кВт/м<sup>2</sup>. Исследования проводились на экспериментальном стенде, описанном в [3].

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы с пористой поверхностью, которые представляют собой горизонтальные медные трубы размером  $\varnothing 26 \times 2$  мм, на наружную поверхность которых напекалась капиллярно-пористая структура из разных фракций порошка меди марки ПМС-Н. Изготовление капиллярно-пористой структуры осуществлялось методом спекания свободной засыпки медного порошка в среде аргона в течение 1 часа при температуре от 1030°C до 1050°C. Для формирования пористой структуры использовалась оснастка из двух втулок – наружной из коррозионной стали и медной втулки образца. Спекаемый порошок засыпался в свободное пространство между втулками. Втулки устанавливались на подложку из коррозионностойкой стали. Для предотвращения диффузии меди и припекания медного порошка поверхность наружной втулки предварительно подвергалась термообработке на воздухе в течение 3 часов при температуре 700°C, в результате чего на поверхности втулки образовывалась защитная окисная пленка. С целью получения образцов с разной толщиной капиллярно-пористой структуры применялись наружные втулки с разным внутренним диаметром. В процессе спекания медного порошка происходила его центральная усадка и припекание к медной втулке. Для обеспечения надежного припекания порошка предварительно производилась активация наружной поверхности медной втулки посредством пескоструйной обработки. Благодаря усадке после спекания и охлаждения до комнатной температуры медная втулка с напеченным слоем капиллярно-пористой структуры свободно извлекалась из наружной втулки.

Для всех исследованных спеченных капиллярно-пористых структур из разных фракций порошка меди марки ПМС-Н, изготовленных методом свободной засыпки, открытая пористость составляла 50–55%. Втулка с нанесенным на нее покрытием плотно надевалась на гладкий образец. Для исключения попадания хладагента в незначительный зазор между гладким образцом и медной втулкой заполнялся термопастой.

В таблице 1 приведены характеристики исследованных образцов.

**Таблица 1**

Параметры пористого покрытия

№ образца	Толщина слоя пористого покрытия $\delta$ , мм	Диаметр частиц $d_c$ , мкм	Пористость, %
1	0,5	50	50-55
2		100	
3	0,7	50	
4		100	
5	1	50	
6		100	

На рис. 2 приведено сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на различных типах поверхностей. Используются данные при кипении на оребренной поверхности с трапецевидным профилем ребра и пористой поверхности с толщиной 1 мм и средним диаметром частиц 100 мкм.

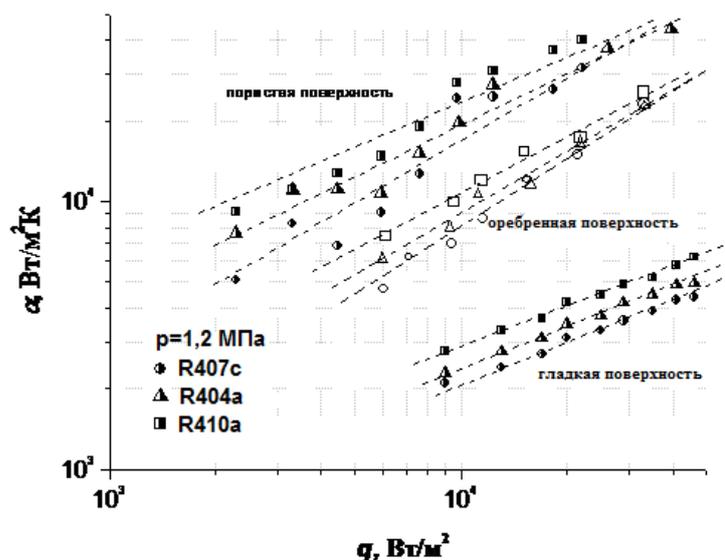


Рисунок 2 – Сравнение интенсивности теплообмена при кипении фреонов R407с, R404а и R410а

Как видно из рис. 2, коэффициенты теплоотдачи при кипении исследуемых хладагентов на поверхности со спеченным капиллярно-пористым покрытием значительно выше, чем на гладкой (в 4 раза) и оребренной (в 1,5 раза), что позволяет сделать вывод о преимуществе пористых покрытий. Применение испарительных трубок с нанесенным капиллярно-пористым покрытием приведет к снижению массогабаритных показателей установок за счет интенсификации теплообмена и меньших размеров трубок по сравнению с оребренными. Интенсификация процесса теплообмена при кипении фреонов наблюдалась во всем исследованном диапазоне тепловых нагрузок.

#### Список использованных источников

1. Смирнов, Г.Ф. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах / Г.Ф. Смирнов, А.Д. Цой. – Москва: Издательство МЭИ, 1999. – 439с.
2. Овсянник, А.В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А.В. Овсянник. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2012. – 284 с.
3. Исследование тепло- и массопереноса при фазовых превращениях однокомпонентных и смесевых озонобезопасных хладагентов: отчет о НИР (заключит.) / ГГТУ им. П.О. Сухого; рук. темы А.В. Овсянник. – Гомель, 2015. – 101 с. – № ГР 20141921.

УДК 621.182

### ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

**Малгаждаров Алибек Нурланович**

*alim.0777@mail.ru*

Студент Евразийского национального университета им.Л.Н.Гумилева,

Астана, Казахстан

Научный руководитель – М.Г.Жумагулов

В последние годы наблюдается существенный рост потребности в энергетических ресурсах, что создает необходимость повышения энергоэффективности действующих теплогенерирующих установок. Наиболее высокого уровня энергоэффективности котельной можно достигнуть только за счёт комплексного подхода к решению конструктивных, технологических, технико-экономических и экологических проблем.