

- блемы безопасности на транспорте: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Гомель: БелГУТ, 2002.- С. 267-268.
2. Врублевская В. И., Невзорова А. Б., Врублевский В. Б. Износостойкие самосмазывающиеся антифрикционные материалы и узлы трения из них. — Гомель: БелГУТ, 2000. — 324 с.
 4. Врублевская В. И. Триботехнические характеристики древесины и научные основы создания и применения антифрикционных самосмазывающихся древесно-полимерных материалов: Дис...докт. техн. наук. — Л., 1987. — 385 с.
 1. Антифрикционные испытания подшипниковых материалов и прессованной самосмазывающейся древесины/ В. И. Врублевская, К. М. Сидоренко, В. Б. Врублевский, А. Б. Невзорова, Ю. Е. Кирпиченко// Трение, износ, смазка (электр. ресурс).- 2003. — Т. 5. №2(17). - 14 с.

Аннотация

Разработан новый ресурсосберегающий материал, позволяющий значительно снизить расход металла, а также улучшить триботехнические параметры узлов трения машин и механизмов. Одновременно с этим рассматривается проблема замещения производственных испытаний компьютерным моделированием при внедрении изделия в серийное производство.

Summary

It was developed a new resource saving material which allows to save metal used and improve tribotechnical parameters of machinery friction units. Simultaneously the problem of replacement of industrial tests by computer modeling during introduction of units into mass production process.

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ИСПАРИТЕЛЕ

**Д.Г. Калишук, Н.П. Саевич, А.И. Ершов,
А.В. Татульченков**
*УО «Белорусский государственный
технологический университет»*

Энергоемкость многих производственных процессов может быть снижена за счет рекуперации и утилизации тепла технологических сред. Утилизация вторичных энергоресурсов (ВЭР) высокого потенциала не требует существенных затрат. Тепло ВЭР низкого потенциала использовать затруднительно из-за малого значения движущей силы теплообмена. Для удешевления технологий рекуперации и утилизации тепла ВЭР низкого потенциала, в первую очередь за счет снижения капитальных затрат, расширения круга их применения необходимы интенсификация теплообмена, разработка эффективного энергосберегающего оборудования и методик его расчета.

Если в процессе утилизации ВЭР низкого потенциала принимающим теплоносителем является кипящая жидкость, а отдающим – конденсирующийся пар (процессы выпаривания, ректификации и др.), то при малых температурных напорах между ними общую интенсивность процесса, как правило, лимитирует теплоотдача в кипящей жидкости. Поэтому разработка и исследование новых методов интенсификации теплообмена при кипении представляет значительный научный и практический интерес.

Существуют различные конструктивные и технологические методы интенсификации кипения, в том числе за счет диспергирования газа или пара в кипящую жидкость [1,2], но публикации, представляющие результаты исследований этого метода, отсутствуют.

Нами были проведены экспериментальные исследования интенсификации кипения жидкости в вертикальной трубе с вводом острого пара на экономайзерном участке. Выбор вертикальной трубы в качестве объекта исследований обусловлен тем, что она является элементом наиболее распространенного типа трубчатых испарителей. Результаты поисковых исследований [3] свидетельствуют об увеличении коэффициента теплопередачи при вводе острого пара в кипящую жидкость до 50 %. Установлено, что на степень интенсификации влияют температурный напор, уровень жидкости, расход острого пара.

С целью детализации влияния различных параметров на интенсивность кипения, получения локальных характеристик процесса была создана экспериментальная установка и отработана методика проведения опытов [4]. Исследовательской ячейкой являлся вертикальный однотрубный испаритель с контуром естественной циркуляции. Процесс кипения осуществлялся в медной трубе с внутренним диаметром 20 мм. Высота обогреваемого участка ее составляла 1 м. В стенке трубы на различных уровнях завальцованы термодатчики. Модельной жидкостью являлась дистиллированная вода. Давление пара над кипящей жидкостью поддерживалось близким к атмосферному. В качестве острого пара применялся водяной насыщенный пар.

Исследования проводились при относительных уровнях светлой жидкости в трубе от 0,35 до 0,75. Относительный расход острого пара β при проведении опытов изменялся от 0,15 до 0,5. Он определяется как отношение расхода острого пара к расходу пара, получаемого за счет внешнего обогрева без интенсификации при тех же режимных параметрах (уровне светлой жидкости, температурном напоре). Температурный напор в кипящей жидкости ΔT устанавливался в пределах 2,5–11,5 К.

На первом этапе исследований была проведена серия опытов без интенсификации теплообмена. При этом определено влияние высоты уровня светлой жидкости в кипящей трубе h и температурного напора ΔT на интенсивность теплообмена. Эксперимент предусматривал мероприятия по устранению эффекта приработки поверхности нагрева и исключению влияния гистерезиса по тепловому потоку.

Опытные значения коэффициента теплоотдачи при кипении α определялись по известному уравнению Ньютона – Рихмана как отношение плотности теплового потока q к разности температур поверхности стенки $T_{ст}$ и кипения T_0 .

Интенсивность теплообмена при кипении зависит от большого количества разнообразных факторов, влияние которых зачастую не поддается точной оценке. Многочисленными исследованиями установлено, что при кипении в большом объеме и трубах влияние плотности теплового потока на теплообмен является определяющим и характеризуется следующей эмпирической зависимостью:

$$\alpha = f(q) = Cq^n \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи при кипении; C, n – коэффициенты.

При обработке результатов собственных экспериментальных исследований для оптимального уровня светлой жидкости в кипящей трубе выявлено, что функция (1) имеет характерный излом на границе зон конвективной передачи тепла ($\alpha \sim q^{0,34}$) и развитого пузырькового кипения ($\alpha \sim q^{0,61}$).

Полученные эмпирические уравнения имеют простой вид, но не отражают влияния различных параметров на интенсивность теплообмена и, следовательно, имеют узкие

пределы применимости. Более ценными представляются уравнения в критериальной форме.

Анализ значительного числа расчетных соотношений для процесса кипения в области развитого пузырькового режима, полученных различными авторами, сопоставление их с большим количеством экспериментальных данных, в том числе собственных, привел нас к следующему выводу: экспериментальные данные с наименьшей погрешностью обобщаются двумя критериальными системами, предложенными М.А. Кичигиным и Н.Ю. Тобилевичем [5], и В.И. Толубинским [6] соответственно:

$$Nu = C_1 Pe_u^m Ga^{0.05} K_p^{0.84}, \quad (2)$$

$$Nu = C_1 K^m Pr^{-0.2}, \quad (3)$$

где Nu, Ga, Pr – критерии Нуссельта, Галилея и Прандтля соответственно; Pe_u – критерий Пекле для кипения; K_p – критерий давления; K – критерий Якоба – Толубинского; C_1, m – коэффициенты.

Результаты обработки опытных данных, полученных авторами, с применением критериальной системы М. А. Кичигина – Н. Ю. Тобилевича приведены на рис. 1. Из него видно, что экспериментальные точки удовлетворительно группируются вдоль усредняющей прямой, описываемой уравнением $Nu Ga^{-0.05} K_p^{-0.84} = 2.4 \cdot 10^{-4} Pe_u^{0.61}$. Подобные результаты (с отклонением экспериментальных данных от расчетных не выше 7 %) получены при использовании критериальной системы В. И. Толубинского, при этом в уравнении (3) $C_1 = 68, m = 0.61$.

$$Nu Ga^{-0.05} K_p^{-0.84}$$

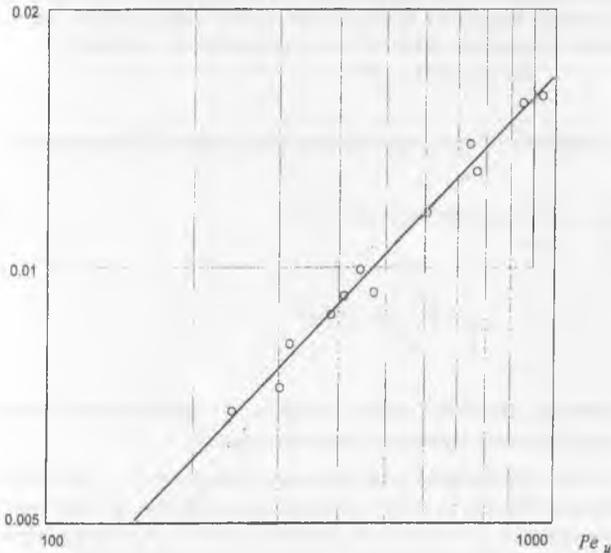


Рисунок 1 – Обработка опытных данных по кипению без острого пара

На втором этапе исследований проводились опыты с подводом острого пара в кипящую жидкость. Результаты эксперимента по изучению влияния количества подводимой легкой фазы на интенсификацию теплообмена представлены на рис. 2 в виде зависимости $\alpha = f(\Delta T, \beta)$ при $h = 0.5$. Подвод острого пара в жидкость способствует повышению коэффициента теплообмена при кипении, причем с увеличением β степень интенсификации возрастает. Влияние плотности теплового потока на коэффициент теплоотдачи при этом неоднозначно. При достижении некоторой критической величины q , значение которой меньше плотности теплового потока, соответствующей переходу из свободно-конвективной зоны в зону пузырькового кипения, происходит резкое увеличение коэффициента теплоотдачи. Дальнейшее увеличение q приводит к снижению интенсифицирующего эффекта, причем коэффициент теплоотдачи остается на 10–15% выше, чем при кипении без подвода острого пара при одних и тех же режимных параметрах. Также установлено, что положительное воздействие ввода острого пара возрастает при увеличении уровня светлой жидкости в кипяточной трубе. Однако этот рост незначителен при уровнях жидкости выше оптимального.

Коэффициент теплоотдачи при кипении воды и разбавленных водных растворов с вводом острого пара α_n предлагается определять по формуле

$$\alpha_n = B\alpha. \quad (4)$$

На рис.3 представлены экспериментальные зависимости коэффициента B от температурного напора ΔT при различных значениях β и $h = 0.5$. Наиболее бурный рост интенсивности теплоотдачи при вводе острого пара в кипящую жидкость по сравнению с ее интенсивностью без ввода острого пара наблюдался при $\beta = 0.25$ – 0.33 .

При обобщении результатов экспериментальных исследований интенсификации теплообмена при кипении жидкости в вертикальной трубе с вводом острого пара для оптимальных режимов ведения процесса получено эмпирическое уравнение

$$B = 12.1e^{0.152 \cdot q^{-0.196}}. \quad (5)$$

Расчетная зависимость (4) после преобразований с учетом (2,3) принимает вид

$$\alpha_n = B \frac{\lambda}{l_0} 2.39 \cdot 10^{-4} Pe_n^{0.61} Ga^{0.05} K_p^{0.84}, \quad (6)$$

или

$$\alpha_n = B \frac{\lambda}{l_0} 68 K^{0.61} Pr^{-0.2}, \quad (7)$$

где λ – коэффициент теплопроводности жидкости; l_0 – определяющий геометрический размер (пропорционален отрывному диаметру пузыря).

При $\beta = 0.1$ – 0.5 , $q = 20$ – 80 кВт/м² относительное отклонение α_n , рассчитанных по (6) и (7), от экспериментальных их величин, полученных авторами, не превышает 8 %.

Критериальные уравнения, полученные авторами, могут быть рекомендованы для инженерных расчетов интенсифицированных вертикальных испарителей с вводом острого пара в кипящую жидкость.

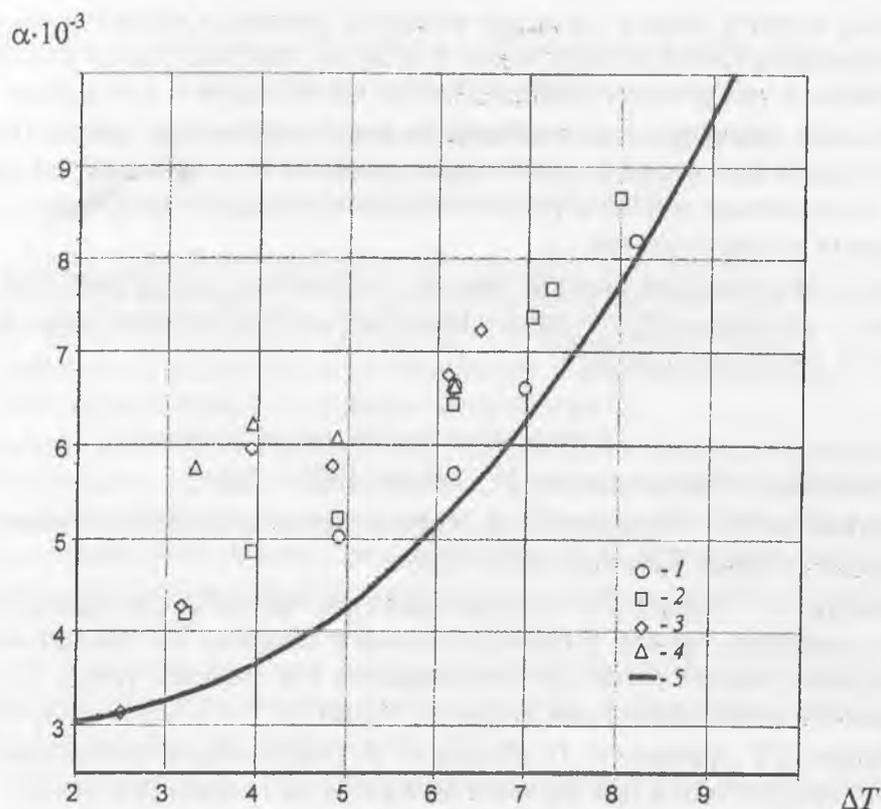


Рисунок 2 - Зависимость α от ΔT при $h = 0.5$ и различных значениях β : 1- $\beta = 0.15$; 2- $\beta = 0.25$; 3- $\beta = 0.33$; 4- $\beta = 0.50$; 5- $\beta = 0$. α , Вт/(м²·К); ΔT , °С

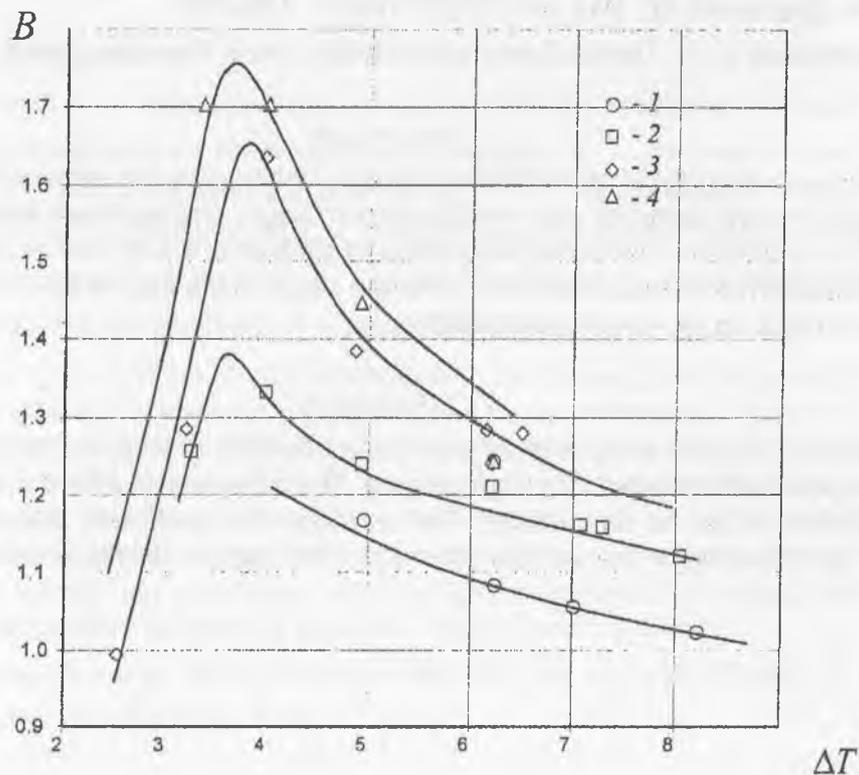


Рисунок 3 - Зависимость $B = \alpha_n / \alpha$ от ΔT при $h = 0.5$ и различных значениях β : обозначения точек 1-4- см. рис.2. ΔT , °С

Выводы:

- подвод острого пара в кипящую жидкость является эффективным способом увеличения коэффициентов теплообмена при малых температурных напорах, за счет него можно добиться увеличения коэффициентов теплоотдачи в 1.5–2 раза;
- изменение характера теплообмена за счет «взрывного» увеличения коэффициентов теплоотдачи при вводе острого пара возникает при меньших температурных напорах, чем критические температурные напоры перехода от свободно-конвективного режима кипения к пузырьковому;
- интенсифицирующее воздействие на теплообмен возрастает при увеличении относительного расхода острого пара и максимально при кипении воды в диапазоне температурного напора от 3 до 6 К.

Список использованных источников

1. Таубман Е. И. Выпаривание. М., Химия, 1982.– 328 с.
2. Федоткин И. М., Ткаченко С. И. Теплогидродинамические процессы в выпарных аппаратах. Киев, Техника, 1975.– 213 с.
3. Калишук Д. Г., Саевич Н. П. Исследование теплообмена при малых температурных перепадах между теплоносителями и аспекты его применения в энергосберегающих технологиях// Тр. Белорусского гос. технол. ун-та. Вып. VIII. Химия и технология неорганических веществ. Минск, БГТУ, 2000. С. 228–236.
4. Калишук Д. Г., Саевич Н. П., Ершов А. И. Особенности теплообмена, рекуперации и утилизации тепла при малых температурных перепадах между теплоносителями // Тепломасообмен ММФ-2000. IV Минский междунар. форум 22–26 мая 2000 г. Минск, 2000. Т. 11. С. 104–108.
5. Кичигин М. А., Тобилевич Н. Ю. Об обобщении экспериментальных данных по теплообмену при кипении // Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления. М., Изд. АН СССР, 1955. С. 175–185.
6. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. Киев, Наукова думка, 1980 – 316 с.

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований интенсификации теплообмена при кипении воды за счет ввода острого пара. Определено влияние различных параметров на степень интенсифицирующего эффекта. Получено уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости в вертикальной трубе с подводом острого пара на их начальном участке.

Summary

The results of experimental researches of intensification of heatexchange at water boiling when the vapour is introduced in it is given here. The influence of different factors on the rate of intensification effect is determined. The equation for coefficient calculation of heatexchange at liquid boiling in the vertical pipe when the vapour is introduced into the inlet the pipe.