

### КИПЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ

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.

Аппараты и установки, в которых происходит генерация паровой фазы при кипении жидкостей, широко применяются в различных технологиях, в том числе химических производствах. Как правило, в качестве греющего агента в испарительных устройствах используется водяной или иной пар. Теплоотдача при конденсации характеризуется высокой интенсивностью по сравнению с интенсивностью теплоотдачи при поверхностном кипении, которое обычно наблюдается при малых температурных напорах между теплоносителями. Это присуще в первую очередь процессам испарения термочувствительных жидкостей. Подобного рода явления также наблюдаются при утилизации вторичного тепла паров, обладающих низким температурным потенциалом, например, в многоступенчатых ректификационных и выпарных установках. С целью снижения общего термического сопротивления в таких случаях следует повышать интенсивность теплообмена в кипящей жидкости.

Для интенсификации кипения жидкости при малых температурных напорах используют и предлагают к использованию пассивные и активные методы [1]. Наиболее известные и изученные пассивные методы предусматривают:

- изменение характера и свойств теплообменной поверхности со стороны кипящей жидкости с целью увеличения плотности центров парообразования (оребрение, канавки, лунки, пористые покрытия, структуры типа фитилей и т. д.);

- установку турбулизаторов (шнеков, проволочных спиралей и т. п.);

- нанесение покрытия из несмачиваемых материалов.

Для активной интенсификации предлагается подвергать поверхность теплообмена вращению, воздействию вибрации, ударов, влиять на жидкость акустическими, электростатическими и другими полями, а также с целью турбулизации пропускать через нее газы.

Однако по различным причинам большинство из перечисленных выше методов не могут быть практически реализованы в типовых кожухотрубчатых испарителях. Пористые поверхности и поверхности с искусственной шероховатостью быстро теряют свои интенсифицирующие свойства из-за загрязнений. Тур-

булизаторы и оребрение поверхностей малоэффективны в условиях естественной конвекции. К тому же они затрудняют движение жидкости через испаритель. Плохо смачиваемые покрытия ненадежны из-за отслоения и разрушения. Воздействие различного рода полей на кипение мало изучено. Кроме того, аппаратура, пригодная для создания этих полей с заданными характеристиками в промышленных испарителях, не разработана.

Интенсификация кипения может достигаться при диспергировании острого пара в кипящую жидкость [1–3]. Однако результаты исследований, дающие количественную характеристику этого метода, в публикациях не представлены. Поэтому экспериментальные исследования данного метода интенсификации и анализ их результатов с целью создания более эффективных и компактных испарителей представляют научный и практический интерес.

Авторами были проведены экспериментальные исследования интенсификации кипения жидкости в вертикальной трубе за счет ввода острого пара на ее начальном участке. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1 [4]. Процесс осуществлялся в вертикальном одноструйном испарителе 15 с контуром естественной циркуляции. Контур циркуляции включал в свой состав сепаратор 26, циркуляционную трубу 25 со смотровым фонарем 24, термостат 38 и подогреватель 13. Термостат 38 и подогреватель 13 использовались для подогрева жидкости, поступающей в испаритель 15, до температуры, близкой к ее температуре кипения. Необходимый для обогрева испарителя 15, подогревателя 13 и термостата 38 пар поступал из парогенератора 39. Для получения острого пара использовался генератор острого пара 31.

Исследовательской ячейкой являлась медная труба с внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенки 4 мм, имевшая обогреваемый участок высотой 1 м. Контроль температур стенки трубы и теплоносителей проводился термопарами. Модельной жидкостью являлась дистиллированная вода. Исследования велись при давлении пара над кипящей жидкостью, близком к атмосферному. В качестве острого пара применялся водяной насыщенный пар давлением 110–200 кПа. Опыты проводились

при уровнях светлой жидкости в зоне нагрева от 0,35 до 0,75 м. Относительный расход острого пара  $\beta$  в ходе эксперимента изменялся от 0,15 до 0,5. Величина  $\beta$  определялась 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 (разность температур поверхности стенки трубы и насыщения жидкости)  $\Delta T$  устанавливался в пределах от 2,5 до 11,5 К.

На первом этапе исследований была проведена серия опытов без интенсификации теплообмена. При комплексном анализе научной литературы и данных собственных исследований для области развитого пузырькового кипения в вертикальных трубах уста-

новлено, что результаты эксперимента такого рода с наименьшей погрешностью обобщаются безразмерным уравнением, основанным на критериальной системе М. А. Кичигина и Н. Ю. Тобилевича [5]:

$$Nu = C_1 Re_u^m Ga^{0,05} K_p^{0,84}, \quad (1)$$

где  $C_1$  и  $m$  – коэффициенты;  $Nu$  и  $Ga$  – критерии Нуссельта и Галилея соответственно;  $Re_u$  – критерий Пекле для кипения;  $K_p$  – критерий давления.

При обобщении результатов собственных экспериментальных исследований авторы установили, что  $C_1 = 2,39 \cdot 10^{-4}$ , а  $m = 0,61$ . Относительное отклонение опытных значений коэффициента теплоотдачи от рассчитанных по уравнению (1) при этом не превышает 6,5 %.

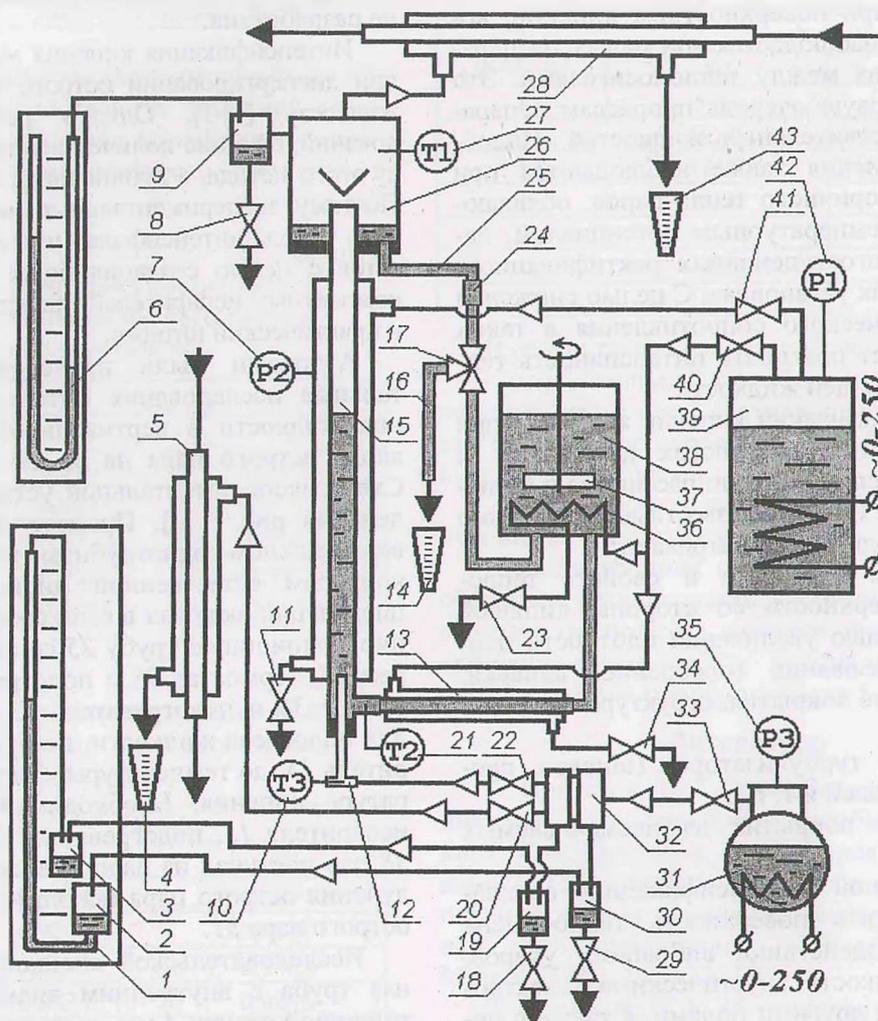


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1, 6 – дифференциальный манометр; 2, 3, 9, 19, 30 – сборник конденсата; 4, 14, 43 – мерный сосуд;
- 5, 28 – конденсатор; 7, 35, 42 – манометр; 8, 18, 20, 22, 29 – кран; 10, 21, 27 – термометр;
- 11, 23, 33, 34, 40, 41 – вентиль; 12 – узел ввода острого пара; 13 – подогреватель;
- 15 – испаритель; 16 – отводящий трубопровод; 17 – трехпозиционный кран; 24 – смотровой фонарь;
- 25 – циркуляционная труба; 26 – сепаратор; 31 – генератор острого пара; 32 – диафрагма;
- 36 – паровой змеевик; 37 – мешалка; 38 – термостат; 39 – парогенератор

На втором этапе исследований проводились опыты с подводом острого пара в кипящую жидкость. В результате было выявлено, что подвод острого пара в жидкость способствует повышению коэффициента теплоотдачи при кипении и с увеличением  $\beta$  степень интенсификации возрастает. Влияние плотности теплового потока  $q$  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, однако коэффициент теплоотдачи остается на 10–15 % выше, чем при кипении без подвода острого пара при тех же режимных условиях (см. рис. 2). Кроме того, установлено, что положительное воздействие ввода острого пара возрастает при увеличении уровня светлой жидкости в кипятильной трубе. Однако этот прирост незначителен при уровнях жидкости выше оптимального [6].

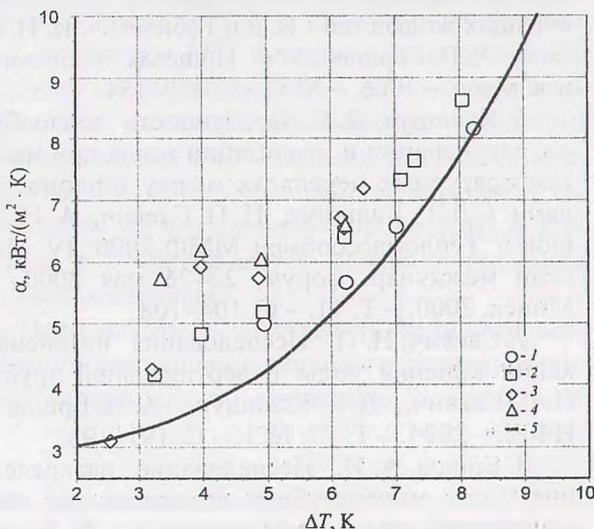


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи для кипящей воды от  $\Delta T$  при уровне светлой жидкости 0,5 м: 1 —  $\beta = 0,15$ ; 2 —  $\beta = 0,25$ ; 3 —  $\beta = 0,33$ ; 4 —  $\beta = 0,50$ ; 5 —  $\beta = 0$

Аналогичный эксперимент был проведен на другой модельной среде — водном растворе сахарозы с содержанием сухих веществ 0,40 кг/кг. Качественно влияние температурного напора, уровня светлой жидкости и относительного расхода острого пара на степень интенсификации не отличалось от их влияния на интенсификацию при кипении воды. Для раствора сахарозы увеличение коэффициента теплоотдачи достигало 130 % (для воды — 70 %).

Коэффициент теплоотдачи для воды и подобных ей по теплофизическим свойствам жидкостей при кипении с вводом острого пара  $\alpha_{и}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), предлагается определять по формуле

$$\alpha_{и} = B\alpha, \quad (2)$$

где  $B$  — коэффициент, характеризующий степень интенсификации теплообмена;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к кипящей жидкости без интенсификации теплообмена, вычисляемый при решении уравнения (1), Вт/(м<sup>2</sup>·К).

В результате обработки опытных данных по кипению без интенсификации и с интенсификацией острым паром, установлено, что

$$B = 12,1\beta^{0,152}q^{-0,196}, \quad (3)$$

где  $q$  — плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.

Зависимость (2) с учетом (1) и (3), а также указанных ранее значений  $C$  и  $m$ , приобретает следующий вид:

$$\alpha_{и} = 2,89 \cdot 10^{-3} \frac{\lambda}{l_0} \beta^{0,152} q^{-0,196} \text{Re}_u^{0,61} \text{Ga}^{0,05} K_p^{0,84}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);  $l_0$  — определяющий линейный размер, пропорциональный отрывному диаметру парового пузыря, м.

Уравнение (4) может быть рекомендовано для инженерных расчетов интенсифицированных вертикальных испарителей с вводом острого пара в кипящую жидкость. При  $\beta = 0,1-0,5$  и  $q = 20-80$  кВт/м<sup>2</sup> (см. рис. 3) относительное отклонение коэффициентов теплоотдачи, рассчитанных по указанной зависимости, от экспериментальных не превышало 7 %.

Согласно результатам исследований, при малых температурных напорах достижимо увеличение коэффициентов теплоотдачи в кипящей жидкости в 1,5–2 раза. Выяснено также, что максимальный положительный эффект обеспечивается при равномерном и четком распределении острого пара по трубам испарителя [7, 8].

В настоящее время нами проводятся исследования интенсификации кипения при двухступенчатом, с «набросом тепла» на экономайзерном участке, подводе энергии к жидкости. Этот метод, как мы предполагаем, более перспективен при практической реализации из-за упрощения аппаратурно-технологического оформления. Нижняя часть двухступенчатого испарителя в таком случае обогревается паром высоких параметров. Она по сравнению с верхней основной частью, использующей тепло пара низких параметров, имеет малые размеры. За счет высокого температурного напора в нижней ступени значительно уменьшается высота

экономайзерного участка. Это приводит к увеличению осредненной по поверхности теплообмена испарителя плотности теплового потока.

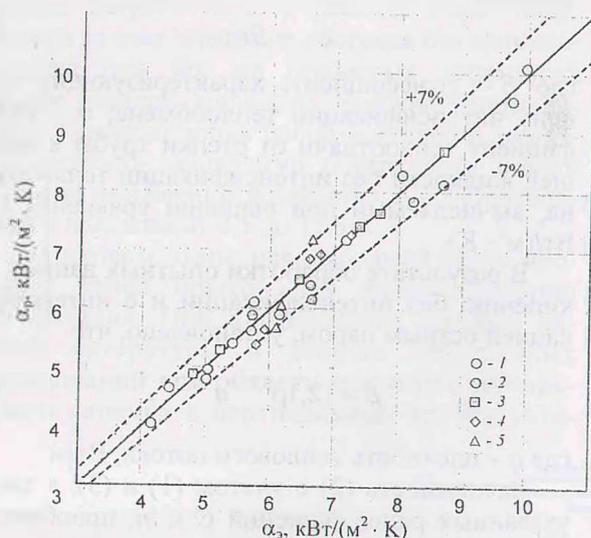


Рис. 3. Корреляция расчетных  $\alpha_p$  и экспериментальных  $\alpha_z$  коэффициентов теплоотдачи: 1 –  $\beta = 0$ ; 2 –  $\beta = 0,15$ ; 3 –  $\beta = 0,25$ ; 4 –  $\beta = 0,33$ ; 5 –  $\beta = 0,50$

Нами проведены поисковые экспериментальные исследования по определению параметров работы одноструйного двухступенчатого испарителя с контуром естественной циркуляции. Модельной кипящей жидкостью являлась вода при атмосферном давлении. Результаты проведенных опытов показали, что в исследованных режимах при «набросе тепла» на нижней ступени повышение осредненной плотности теплового потока достигало 60%. Поверхность нижней ступени при этом составляла лишь 5% от общей поверхности теплообмена. Кроме того, отмечено существенное возрастание интенсивности циркуляции жидкости в испарительном контуре.

Как указано ранее, предложенные методы интенсификации теплообмена могут быть использованы при утилизации низкопотенциального тепла и в испарительных технологиях переработки термочувствительных жидких сред. Однако вследствие значительного влияния капитальных затрат на стоимость процессов теплообмена, осуществляемых при малых перепадах температур, при определении целесообразности применения данных методов необходимо проводить технико-экономический

анализ. Методика такого анализа разработана авторами и апробирована при модернизации многоступенчатых ректификационных установок в производстве капролактама [9].

### Литература

1. Дрейцер, Г. А. Современное состояние исследований интенсификации теплообмена в каналах и перспективы создания компактных теплообменных аппаратов / Г. А. Дрейцер // Теплообмен ММФ-96: III Минский международный форум, 20–24 мая 1996 г. – Минск, 1996. – Т. 10, ч. 1. – С. 26–39.
2. Таубман, Е. И. Выпаривание / Е. И. Таубман. – М.: Химия, 1982. – 328 с.
3. Федоткин, И. М. Теплогидродинамические процессы в выпарных аппаратах / И. М. Федоткин. – Киев: Техніка, 1975. – 212 с.
4. Саевич, Н. П. Интенсификация теплообмена путем ввода острого пара в жидкость на экономайзерном участке вертикальных трубчатых аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Н. П. Саевич; Бел. гос. техн. ун-т. – Минск, 2004. – 22 с.
5. Тобилевич, Н. Ю. Критериальное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи кипящих жидкостей / Н. Ю. Тобилевич, И. И. Сагань, А. П. Гордиенко // Пищевая технология: изв. вузов. – 1966. – № 5. – С. 150–154.
6. Калишук, Д. Г. Особенности теплообмена, рекуперации и утилизации тепла при малых температурных перепадах между теплоносителями / Д. Г. Калишук, Н. П. Саевич, А. И. Ершов // Теплообмен ММФ-2000: IV Минский международный форум, 22–26 мая 2000 г. – Минск, 2000. – Т. 11. – С. 104–108.
7. Саевич, Н. П. Исследования интенсификации кипения воды в вертикальной трубе / Н. П. Саевич, Д. Г. Калишук, А. И. Ершов // ИФЖ. – 2004. – Т. 77, № 1. – С. 191–196.
8. Ершов, А. И. Исследование распределения газа в многотрубных аппаратах при взаимодействии двухфазных систем / А. И. Ершов, Н. П. Саевич, Д. Г. Калишук // Энергетика: изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 1995. – № 5–6. – С. 100–104.
9. Калишук, Д. Г. Технико-экономическая оценка утилизации низкопотенциального тепла ректификационных установок / Д. Г. Калишук, Н. П. Саевич, М. В. Коротков // Энергоэффективность. – 1999. – № 9. – С. 21.