

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ С ВВОДОМ ОСТРОГО ПАРА

Теплообменные аппараты и устройства, в которых происходит генерация паровой фазы, являются важной составной частью установок, применяемых во многих отраслях народного хозяйства. Создание более эффективных и компактных испарителей обеспечивает существенную экономию материальных ресурсов и трудозатрат на их изготовление, а поэтому является актуальной научно-технической задачей.

Обычно в качестве греющего агента в испарителях используется конденсирующийся пар. Процесс конденсации характеризуется, как правило, большими коэффициентами теплоотдачи по сравнению с коэффициентами теплоотдачи при поверхностном кипении, особенно при малых температурных напорах. В таких случаях, для уменьшения общего термического сопротивления необходимо повышать интенсивность поверхностного кипения. Поэтому разработка и исследование новых методов интенсификации теплообмена поверхностного кипения представляет значительный научный и практический интерес.

Нами представлены результаты исследований интенсификации теплообмена за счет подвода легкой фазы (пара) в кипящую жидкость. Опыты проводились на модели однотрубного вертикального испарителя с естественной циркуляцией. Кипение различных модельных сред (вода и растворы сахарозы) осуществлялось под атмосферным давлением в диапазоне изменения плотности теплового потока $q = 5 \dots 90 \text{ кВт/м}^2$. Определено влияние на коэффициент теплоотдачи следующих параметров: уровня светлой жидкости в кипятильной трубе h ; температурного напора ΔT ; относительного расхода острого пара β .

Результаты эксперимента позволили выяснить следующее:

- 1) подвод острого пара в кипящую жидкость интенсифицирует теплообмен, причем с увеличением расхода острого пара интенсифицирующий эффект возрастает;
- 2) максимум интенсификации теплообмена при кипении воды наблюдается при температурных напорах от 3 до 6 К, сахарных растворов от 5 до 10 К;
- 3) за счет ввода острого пара в кипящую жидкость при малых температурных напорах в оптимальных режимах ведения процесса можно добиться увеличения коэффициентов теплоотдачи в 1,5...2 раза.

Коэффициент теплоотдачи при кипении воды и разбавленных водных растворов с вводом острого пара α_u , Вт/(м²·К), авторы рекомендуют определять по формуле:

$$\alpha_u = B \cdot \alpha, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи при кипении без интенсификации, Вт/(м²·К); B – коэффициент, характеризующий степень интенсификации теплообмена.

Для расчета значения α существует большое количество расчетных соотношений основанных на теории физического подобия или размерностей [1-5], теории термодинамического подобия [6], а также теоретических и полуэмпирических методов [7, 8].

Проведенный нами анализ показал, что результаты экспериментальных исследований кипения без подвода острого пара с наименьшей погрешностью обобщаются критериальными системами, предложенными М. А. Кичигиным и Н.Ю. Тобилевичем [4, 5], В. И. Толубинским [3]:

$$Nu = C \cdot Pe_u^n Ga^{0,05} K_p^{0,84}, \quad (2)$$

$$Nu = C \cdot K^n Pr^{-0,2}, \quad (3)$$

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

Опыты по исследованию кипения в вертикальном канале без ввода острого пара были также проведены и авторами. Результаты их были сопоставлены с результатами эксперимента других исследователей. При обработке опытных данных для расчета α в критериальных системах (2) и (3) получены следующие уравнения:

$$Nu = 2,39 \cdot 10^{-4} Pe_u^{0,61} Ga^{0,05} K_p^{0,84}, \quad (4)$$

$$Nu = 68 K^{0,61} Pr^{-0,2}. \quad (5)$$

Отклонение опытных значений коэффициентов теплоотдачи от рассчитанных по уравнениям (4) и (5) составляет не более 6,5 %.

Для кипения с интенсификацией в уравнении (1) B надлежит определять следующим образом:

$$B = 0,582 \cdot (1 + \beta)^{0,152} \cdot q^{-0,196} \quad (6)$$

В окончательном варианте расчетные зависимости для определения α_u имеют вид:

$$\alpha_u = B \frac{\lambda}{d_0} 2,39 \cdot 10^{-4} Pe_u^{0,61} Ga^{0,05} K_p^{0,84}, \quad (7)$$

$$\alpha_u = B \frac{\lambda}{d_0} 68K^{0,61} Pr^{-0,2}, \quad (8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К); d_0 – характерный линейный размер, пропорциональный отрывному диаметру парового пузыря [2], м.

При $\beta = 0,15 \div 0,50$, $q = 20 \div 80$ кВт/м² относительное отклонение α_u , рассчитанных по (7) и (8), от экспериментальных не превышает 7 %.

Полученные критериальные уравнения могут быть рекомендованы для инженерных расчетов интенсифицированных вертикальных испарителей с вводом острого пара в кипящую жидкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кружилин Г.Н. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении жидкостей в условиях свободной конвекции // Известия АН СССР, ОТН. – Вып. 5. – 1945.
2. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
3. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. – Киев: Наукова думка, 1980. – 305 с.
4. Кичигин М. А., Тобилевич Н. Ю. // Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления, 175.– М.: Изд. АН СССР, 1955.
5. Петренко Ю. Д., Сагань И. И. Обобщение данных по теплообмену при кипении сахарных растворов в кольцевых каналах // Изв. вузов. Пищевая технология.– 1972.– № 3.– С. 156 – 159.
6. Боришанский В.М., Козырев А.П., Светлова Л.С. Изучение теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей. – В кн. : Конвективная теплопередача в двухфазном и однофазном потоках / Под ред. В.М. Боришанского и И.И. Палеева. – М.-Л., 1964. – С. 71-104.
7. Лабунцов Д.А. Обобщение зависимости для теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости // Теплоэнергетика. – 1960. – № 5.
8. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники / Пер. с польск. Под ред. П.Г. Романкова. – Л.: Госхимиздат, 1961. – 820 с.