

УДК 621.039.524:536.24

М.С.Корегин (5 курс, каф. РиПГС), Н.Д.Агафонова, к.т.н., доц.

ВЕРИФИКАЦИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ С НЕДОГРЕВОМ

Кипение с недогревом или поверхностное кипение возникает при достаточно высоких тепловых нагрузках, когда основная масса жидкости имеет температуру ниже температуры насыщения. При этом температура стенки превышает температуру насыщения. Надежное определение температуры стенки при кипении в каналах и трубах важно как с точки зрения эффективной эксплуатации энергетического оборудования, так и для обеспечения его безопасной работы. Существует несколько методик для расчёта температуры стенки в условиях кипения с недогревом. В данной работе сопоставлены три расчётных модели, и для оценки их результатов были привлечены экспериментальные данные, полученные И.Т.Аладьевым [1] и др., которые охватывают широкий спектр режимных параметров (давлений, тепловых потоков, недогревов и т.д.).

Одной из рассматриваемых расчетных методик является модель Чена [2]. Данная модель применяется как для кипения в условиях насыщения, так и в условиях недогрева (поверхностное кипение). Модифицированная для использования при кипении с недогревом модель Чена имеет вид:

$$\alpha = \alpha_{mic} S \cdot \min \left(1, \frac{t_w - t_s}{t_w - t_f} \right) + \alpha_{mac} F, \quad (1)$$

Теоретическое происхождение формулы Чена обуславливает ее громоздкость и делает ее не слишком удобной для практического применения, поэтому расчёты коэффициента теплоотдачи и температуры стенки по методике Чена возможны лишь с применением современной вычислительной техники. В частности модель Чена заложена в отечественный программный комплекс КОРСАР.

Значительно более удобными могут оказаться интерполяционные зависимости, примером которых является формула ЦКТИ [3].

Формула ЦКТИ записывалась через удельные тепловые потоки:

$$q = \sqrt{q_{конв}^2 + q_{кип}^2}, \quad (2)$$

где

$$q_{конв} = \alpha_{конв} \cdot (t_w - t_f); \quad q_{кип} = \alpha_{кип} \cdot (t_w - t_s), \quad \alpha_{кип} = k \alpha_{\text{бо}}$$

Для определения коэффициента теплоотдачи при кипении в большом объеме использована формула В.М.Боришанского:

$$\alpha_{\text{бо}} = 4,34 q^{0,7} (P^{0,14} + 1,37 \cdot 10^{-2} P^2) = C \cdot q^{0,7}.$$

Коэффициент k в формуле для определения коэффициента теплоотдачи при кипении может быть принят 1 или 0,7. При этом предпочтительной оказывается формула с коэффициентом 0,7, так как температура стенки получается немного выше. Данный коэффициент учитывает отличия условий процесса парообразования в трубах и каналах от условий в большом объеме.

Таким образом, искомая температура стенки может быть рассчитана по формулам

$$t_w = t_s + \frac{q_{кин}^{0,3}}{C}, \quad \text{если } \alpha_{кин} = \alpha_{\bar{\theta}_0}, \quad (3)$$

или

$$t_w = t_s + \frac{q_{кин}^{0,3}}{0,7 \cdot C}, \quad \text{если } \alpha_{кин} = 0,7 \alpha_{\bar{\theta}_0}, \quad (4)$$

где

$$q_{кин} = \sqrt{q^2 - \alpha_{конв}^2 \cdot (t_w - t_f)^2}.$$

Однако расчет температуры стенки по формуле ЦКТИ оказывается сложным из-за необходимости использования итераций. Избавиться от этого недостатка можно, видоизменив второй член формулы (2). В данной работе использована линейная связь между тепловой нагрузкой поверхности нагрева и температурным напором при кипении воды, подобная предложенной Е.Ф.Адиутори [4], с коэффициентами, зависящими от давления:

$$(q_{кин})_{лин} = A \cdot \Delta t - B, \quad (5)$$

где $A = (3,3 P + 5,4) \cdot 10^4$; $B = (5,7 P + 54,7) \cdot 10^4$; P – давление, МПа. При $\Delta t = t_w - t_s < B/A$ $(q_{кин})_{лин}$ принимался равным нулю. Использование линейной зависимости $q(\Delta t)$ дает квадратное уравнение для определения t_w :

$$q^2 = \alpha_{конв}^2 (t_w - t_f)^2 + [A \cdot (t_w - t_s) - B]^2. \quad (6)$$

Были произведены расчёты температуры стенки с помощью расчетной модели Чена и с помощью формулы ЦКТИ, и расчеты показали, что результаты полученные по зависимости Чена оказались завышенными ($(t_w)_{расч} > (t_w)_{эксн}$), причём с ростом недогрева жидкости на входе в канал зависимость Чена дает сильно завышенные значения t_w . Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных значений температуры стенки наблюдается при использовании методик, основанных на интерполяционной формуле ЦКТИ (2).

В области высоких давлений относительная погрешность определения t_w уменьшается, а расчетные значения t_w , полученные по разным алгоритмам сближаются.

Ввиду того, что модель Чена является очень громоздкой и сложной для расчётов, к тому же даёт завышенные результаты, а формула ЦКТИ требует проведения итераций из-за вида формул (3), (4), то целесообразным будет, в качестве альтернативы этим методикам, использование более простой зависимости для расчёта температуры стенки (6). Основной задачей в данной работе является оптимизация линейной зависимости (5) путём подбора коэффициентов A и B для достижения наиболее точных результатов расчёта. Данная методика была бы оправдана, как с точки зрения улучшения качества расчётов, так и в связи с возможностью ускорения счёта.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Аладьев И.Т., Додонов Л.Д., Удалов В.С. Экспериментальные данные по теплоотдаче при пузырьчатом кипении недогретой воды в трубах // Конвективный и лучистый теплообмен.- М.: Изд-во АН СССР, 1960.- С. 79-96.
2. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 296 с.
3. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. Методические указания. РД 24.035.05-89.- Л.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1981.- 211 с.
4. Адиутори Е.Ф. Новые методы в теплопередаче.- М.: Мир, 1977.- 230 с.