

ВЫВОД

Для исследуемой стенки теплоотдача по всей ее поверхности приблизительно одинакова, и градиенты температуры на рядом расположенных участках могут быть вызваны различной температурой на ее внутренней поверхности либо разной толщиной или теплопроводностью изоляции стенки. Различие средних температур стенок может быть вызвано их разной теплоотдачей. Результаты моделирования, приведенные на рисунках, хорошо согласуются с результатами термометрических исследований.

Данная методика использована при расчете нагрева многослойных тел в процессах радиационно-конвективной сушки композиционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е с ь м а н, Р. И. Теплофизика литейных процессов / Р. И. Есьман, В. А. Бахмат, В. М. Королев. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 144 с.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики
и теплотехники

Поступила 5.05.2006

УДК 536.24

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ НИСХОДЯЩЕМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ

Докт. техн. наук, проф. ИСАЕВ Г. И.

Азербайджанская государственная нефтяная академия

В области сверхкритических давлений к настоящему времени проведено значительное число экспериментальных работ по исследованию конвективной теплоотдачи с использованием различных теплоносителей, охватывающих в основном турбулентный режим вынужденного движения. Однако результаты этих исследований являются недостаточными для полного понимания физической сущности механизма теплообмена и разработки расчетных уравнений для оценки интенсивности процесса теплообмена.

Указанные обстоятельства потребовали расширения области исследований в условиях сверхкритических давлений теплоносителей. В настоящей работе приведен ряд результатов экспериментальных исследований теплоотдачи к ламинарному потоку н-гептана в условиях сверхкритических давлений. Рассматривается случай, когда направления вынужденного и свободного движений взаимно противоположны (нисходящее движение жидкости).

Основные преимущества углеводородов заключаются в том, что последние обладают сравнительно низкой величиной критического давления

(например, для н-гептана $p_{кр} = 2,736$ МПа), не вызывают коррозию конструкционных материалов. В литературе неоднократно рассматривались возможности осуществления одноконтурных схем с органическими веществами в атомной энергетике и высказывались идеи использования в реакторе различных углеводородов. Теплофизические свойства н-гептана подробно исследованы в широком интервале изменения давления и температур [1]. Данные по теплофизическим свойствам веществ необходимы для анализа и обобщения полученных результатов.

Процесс теплоотдачи исследовался на экспериментальной установке, представляющей собой разомкнутый циркуляционный контур. Подробное описание установки и методика проведения опытов даны в [2]. Основной элемент установки – экспериментальная труба из нержавеющей стали марок 12X18Н10Т и 0X18Н10Т, длина и диаметр которой выбирались по условиям проводимых исследований. Рабочий участок обеспечен тепловой и гидродинамической стабилизацией. Экспериментальные трубы обогревались переменным электрическим током низкого напряжения, сила которого регулировалась посредством однофазного понижающего трансформатора. При определении коэффициента теплоотдачи максимально возможная относительная погрешность составляла 19 %, а среднеквадратичная – 14 %. Режимные параметры процесса охватывали интервал изменения:

$$p = (1,09-3,00)p_{кр}; \quad t_{ж} = (0,03-1,04)t_{кр};$$

$$t_c = (0,11-2,62)t_{кр}; \quad Re_{ж,d} = 500-3200;$$

$$Gr_{ж,d} = 10^4-10^6; \quad q = 10^4-2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

Для осуществления проектирования и создания современных высоконапряженных теплообменных систем в первую очередь необходима достоверная информация о закономерностях распределения температуры теплоотдающей поверхности стенки канала. В этой связи рассмотрим график зависимости $t_c = f(x)$ (рис. 1), построенный по результатам экспериментальных данных для случая взаимно противоположных направлений естественного и вынужденного движений в условиях: $p = 4,0$ МПа; $t_{ж}^{вх} = 10$ °С; $\rho W = 250$ кг/(м² · с). Очевидно, что при температуре стенки ниже псевдокритической температуры исследуемой жидкости ($t_m = 295$ °С) характер распределения температуры теплоотдающей поверхности стенки трубы такой же, как и при обычном конвективном теплообмене, имеющем место при докритических давлениях (кривые 1–3). По мере увеличения плотности теплового потока температура теплоотдающей поверхности стенки трубы возрастает и приближается к псевдокритической температуре исследуемой жидкости. В результате резкого изменения теплофизических свойств (особенно c_p и ρ) в пристеночном слое наблюдается некоторое нарушение монотонности распределения температуры стенки вдоль канала. Например, при плотности теплового потока $0,890 \cdot 10^5$ Вт/м² температура теплоотдающей поверхности стенки трубы на расстояниях $x = 30-116$ мм возрастает от $t_c = 175,5$ °С до $t_c = 280,3$ °С, а в ее конечной части остается неизменной и равной 294 °С (кривая 4). При значении же плотности теплового потока $q = 1,246 \cdot 10^5$ Вт/м² температура теплоотдающей поверхности

стенки трубы на расстоянии $x \geq 88$ мм от входа остается приблизительно постоянной, равной 287 °С (кривая 5). Таким образом, для данных режимов характерно, что с последующим увеличением плотности теплового потока t_c практически неизменна и экспериментальные точки, полученные при различных значениях q , сливаются, что свидетельствует о наступлении улучшенного режима теплоотдачи. В рассматриваемом случае режим с улучшенной теплоотдачей охватывает интервал изменения плотности теплового потока от $0,890 \cdot 10^5$ до $1,627 \cdot 10^5$ Вт/м². Однако ответ на вопрос о том, какой интервал изменения плотности теплового потока охватывает указанный режим теплоотдачи, по нашему предположению, будет зависеть от величины массовой скорости движущегося потока в канале. Результаты многолетних исследований показали, что уменьшение массовой скорости движущегося потока приводит к заметному снижению интенсивности теплообмена в области $t_c \approx t_m$ [2–5].

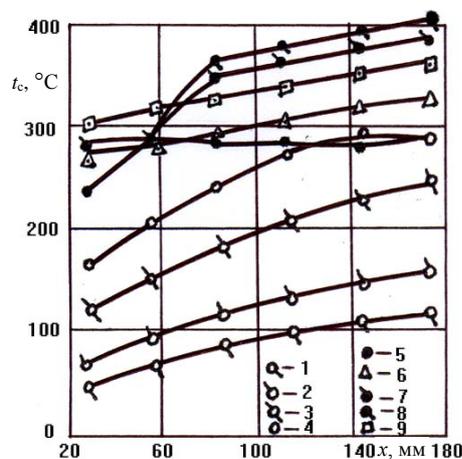


Рис. 1. Зависимость $t_c = f(x)$: 1 – $q = 0,298 \times 10^5$ Вт/м²; 2 – $0,409 \cdot 10^5$; 3 – $0,670 \cdot 10^5$; 4 – $0,890 \cdot 10^5$; 5 – $1,216 \cdot 10^5$; 6 – $1,627 \cdot 10^5$; 7 – $2,063 \cdot 10^5$; 8 – $2,139 \cdot 10^5$; 9 – $3,824 \cdot 10^5$ Вт/м²

В определенном интервале изменения плотности теплового потока ($q = 1,627 \cdot 10^5$ – $2,140 \cdot 10^5$ Вт/м²) температура теплоотдающей поверхности стенки трубы возрастает и наступает относительно ухудшенный режим теплоотдачи (кривые 6–8). При больших значениях плотности теплового потока и высокой температуре теплоотдающей поверхности стенки трубы зафиксировано снижение температуры стенки вплоть до $t_c \approx t_m + 30$ °С (кривая 9).

В интервале изменения плотности теплового потока от $2,139 \cdot 10^5$ до $3,824 \cdot 10^5$ Вт/м² в отдельных сечениях канала температуры охлаждаемой поверхности стенки приблизительно одинаковы, что характеризует устойчивый режим улучшенной теплоотдачи. Среди перечисленных режимов устойчивый режим улучшенной теплоотдачи охватывает довольно широкий интервал изменения плотности теплового потока. Это хорошо видно из графика зависимости $t_c = f(q)$ на (рис. 2), который построен по показаниям термопар, расположенных на расстоянии $x = 110$ мм от входа в трубу, по результатам проведенных исследований при: $p = 4,0$ МПа; $t_{ж}^{вх} = 10$ °С; $\rho W = 250$ кг/(м²·с). Указанная зависимость претерпевает многократные изменения, и в области $t_c \geq t_m$ коэффициент теплоотдачи α увеличивается больше чем 2–3 раза по сравнению с обычными условиями.

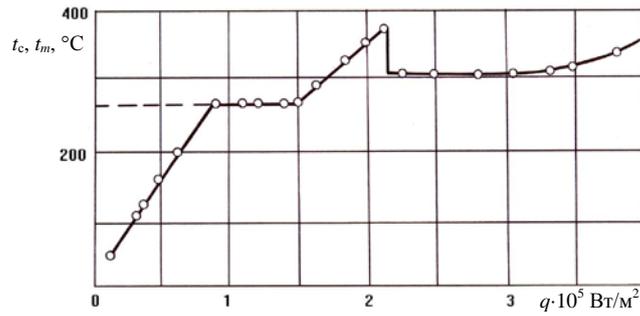


Рис. 2. Зависимость $t_c = f(q)$

На рис. 3 представлена зависимость $\frac{Nu^3}{Nu_0} = f(Gr)$, где Nu^3 – экспериментальное и Nu_0 – расчетное значения критерия Нуссельта для изотермического течения (определяемые по формуле [6]):

$$Nu_{0ж(x)x} = 0,33 Re_{ж(x)x}^{0,50} Pr_{ж(x)x}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж(x)x}}{Pr_{c(x)}} \right)^{0,25} \left(\frac{x}{d} \right)^{0,10}. \quad (1)$$

Здесь в качестве определяющего размера принято расстояние рассматриваемого сечения от начала трубы, а в качестве определяющей температуры – средняя в данном сечении температура жидкости (величина $Pr_{c(x)}$ выбирается по местному значению температуры стенки) [6].

Уравнение (1) можно представить в виде

$$Nu_{0ж(x)d} = 0,33 Re_{ж(x)d}^{0,50} Pr_{ж(x)d}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж(x)d}}{Pr_{c(x)}} \right)^{0,25} \left(\frac{d}{x} \right)^{0,40}. \quad (2)$$

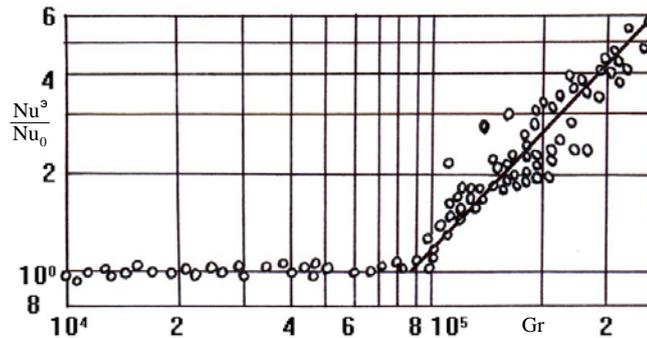


Рис. 3. Зависимость $\frac{Nu^3}{Nu_0} = f(Gr)$

Как видно из рис. 3, указанный график может быть разделен на две части: $Gr < 10^5$ и $Gr > 10^5$. При $Gr < 10^5$ влияние свободной конвекции на характер изменения теплоотдачи незаметно, и локальные значения коэффициента теплоотдачи могут быть определены по (2). При $Gr > 10^5$ экспериментальные данные по локальному значению коэффициента теплоотдачи описываются критериальным уравнением

$$\text{Nu}_{\text{ж}(x)d} = 0,405 \text{Re}_{\text{ж}(x)d}^{0,50} \text{Pr}_{\text{ж}(x)d}^{0,43} (\text{Gr} \cdot 10^{-5})_{\text{ж}(x)d}^{1,15} \left(\frac{d}{X}\right)^{0,40}. \quad (3)$$

Или же с учетом (2) уравнение (3) может быть представлено в виде

$$\text{Nu}_{\text{ж}(x)d} = 1,227 \text{Nu}_{0\text{ж}(x)d} (\text{Gr} \cdot 10^{-5})_{\text{ж}(x)d}^{1,15}, \quad (4)$$

где согласно [7]

$$\text{Gr} = g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{с}}) \rho_{\text{ж}} \frac{d^3}{\mu_{\text{ж}}}. \quad (5)$$

Критериальные зависимости (2) и (4) описывают теплоотдачу н-гептана соответственно при вязкостном и вязкостно-гравитационном режимах в пределах погрешности опыта.

ВЫВОД

При условии $t_c \geq t_m$ установлено немонотонное изменение температуры теплоотдающей поверхности стенки как по длине канала, так и в зависимости от плотности теплового потока. При этом обнаружены отдельные режимы теплоотдачи, характерные для сверхкритической области. На основании проведенных исследований предложены уравнения, позволяющие оценить интенсивность теплообмена для случая взаимной противоположности направлений естественного и вынужденного движений.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

c_p – изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К); d – внутренний диаметр трубы, мм; Gr – критерий Грасгофа; g – ускорение свободного падения, м/с²; Nu – критерий Нуссельта; p – давление, МПа; Pr – критерий Прандтля; $p_{\text{кр}}$ – критическое давление, МПа; q – плотность теплового потока, Вт/м²; Re – критерий Рейнольдса; $t_{\text{ж}}$ – температура жидкости, °С; $t_{\text{ж}}^{\text{вх}}$ – температура жидкости на входе, °С; $t_{\text{с}}$ – температура внутренней поверхности стенки, °С; t_m – псевдокритическая температура, °С; W – средняя скорость жидкости, м/с; x – расстояние от входа трубы, мм; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·С); μ – динамическая вязкость, Н·с/м²; ρ – плотность, кг/м³; ρW – массовая скорость, кг/(м²·с).

Индексы: вх – вход; ж – жидкость; $\text{ж}(x)$ – значение критериев определяется по местному значению температуры жидкости; кр – критическое; 0 – изотермическое течение; с – стенка; $\text{с}(x)$ – значение критериев определяется по местному значению температуры стенки; э – эксперимент; d – в качестве определяющего размера принят диаметр трубы; m – псевдокритическое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, Б. А. Исследование теплофизических свойств нефти, нефтепродуктов и углеводородов: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Б. А. Григорьев. – Баку, 1979. – 524 с.
2. Исаев, Г. И. Исследование теплоотдачи при вынужденном движении н-гептана и околкритическом давлении жидкости / Г. И. Исаев // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т. 3, № 4. – С. 33–37.
3. Исаев, Г. И. Теплообмен при сверхкритических давлениях / Г. И. Исаев // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1981. – № 2. – С. 67–72.

4. И с а е в, Г. И. Определение границы перехода от вязкостного к вязкостно-гравитационному режиму при переходном режиме вынужденного движения органических теплоносителей / Г. И. Исаев, И. Т. Арабова, Ф. Х. Мамедов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1991. – № 2. – С. 116–120.

5. Г р а н и ц ы режимов улучшенной теплоотдачи при сверхкритическом давлении органических теплоносителей / Г. И. Исаев [и др.] // ИФЖ. – 2001. – Т. 74, № 5. – С. 78–80.

6. И с а ч е н к о, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981.

7. И к р я н н и к о в, Н. П. К расчету теплоотдачи в однофазной околокритической области при вязкостно-инерционном течении / Н. П. Икрянников, Б. С. Петухов, В. С. Протопопов // ТВТ. – 1973. – Т. 11, № 5. – С. 1068–1075.

Представлена кафедрой
теплоэнергетики

Поступила 20.04.2006

УДК 621.311

К ПОСТРОЕНИЮ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЭС И ИХ ОПЕРАТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ

Инж. НАСИБОВ В. Х.

АзНИИ энергетики и энергопроектирования

Как известно, для управления режимом работы энергосистемы, оптимизации краткосрочных режимов и оперативной их дооптимизации необходимы аналитические расходные характеристики (РХ) и характеристики относительных приростов (ХОП) расхода энергоносителя. Для агрегатов ГЭС они строятся на основе имеющихся графиков расходно-напорных характеристик, представленных заводом-изготовителем или полученных в результате специальных опытов.

Рассматриваем методику аналитического построения расходных характеристик $Q = f(H, P)$ и характеристик относительного прироста $q = f(H, P)$ для ГЭС. Анализ графиков показывает, что напорно-расходные графики представляют собой зависимости $Q = f(H)$ при различных мощностях агрегата P , поддерживаемых постоянными. Для получения аналитического выражения необходимо для каждого значения P аппроксимировать зависимость $Q = f(H)$, но в этом случае получается около 30 различных уравнений только для одного агрегата, и очень трудно использовать их в процессе дооптимизации режима. Для уменьшения числа аппроксимирующих уравнений зависимостей $Q = f(H, P)$ и $q = f(H, P)$ можно использовать метод факторного планирования эксперимента с аппроксимацией данных зависимостей линейной или квадратичной моделями в соответствии с требуемой точностью. Для линейной модели расходная характеристика может аппроксимироваться билинейной характеристикой вида