

для всех металлов эти величины для ТЭС СНГ в 3...4 раза выше, чем для ТЭС Европейских стран.

3. Процесс десульфуризации, наряду со снижением выбросов SO<sub>2</sub>, позволяет в 2...3 раза снизить эмиссию тяжелых металлов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sustainable energy developments in Europe and North America / Econ. Comiss. For Europe / Geneva – N.-Y. UN, 1991. – VII. – 217 p.
2. Atmospheric Emission Inventory Guidebook. A joint EMEP/CORINAIR Production Prepared by the EMEP Task Force on Emission Inventories. – 1996.
3. Юровский А. Э. Минеральные компоненты твердых горючих ископаемых. – М., 1968. – 215 с.
4. Клер В. Р. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. – М., 1987. – 237 с.
5. Юдович Я. Т., Кетрис М. П., Мерц А. В. Элементы-примеси в ископаемых углях. – Л., 1985. – 238 с.
6. Юдович Л. Э. Грамм дороже тонны: Редкие элементы в углях. – М.: Наука, 1989. – 157 с.
7. Лебедев В. В. Комплексное использование углей. – М., 1980. – 238 с.
8. Шпирт М. Я., Клер В. Р., Перциков И. З. Неорганические компоненты твердых топлив. – М.: Химия, 1990. – 239 с.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. – М., 1973.
10. Emission factors manual PARCOM-ATMOS. Emission factors for air pollutants. Final version – TNO Report 92-233/112322. – 1992.
11. Розанова Ф. А., Зенич Т. С. Способы оценки выбросов от стационарных топливосжигающих устройств в Беларуси. Сравнение с «Руководством по инвентаризации выбросов ЕМЕП/CORINAIR»: Докл. на междунар. семинаре по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. – Мн., 1–2 октября, 1997.
12. Обзор технико-экономических показателей и анализ топливоиспользования тепловых электростанций Минэнерго СССР за 1991 год. – М., 1992.

Представлена Ученым советом  
ИРФХП НАН Беларуси

Поступила 22.05.2001

УДК 536.24

### **ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ ВЫНУЖДЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ**

**Докт. техн. наук, проф. ИСАЕВ Г. И., канд. техн. наук ГУСЕЙНОВ Т. А.,  
инженеры АЛИЕВА С. Х., ВЕЛИЕВА Ш. А., ТАГИЕВА З. Г.**

*Азербайджанская государственная нефтяная академия*

Теплоотдача при ламинарном режиме вынужденного движения жидкости в условиях сверхкритических давлений (за исключением [1, 2]) практически не исследована. Причем в указанных работах экспериментальные данные по коэффициенту теплоотдачи углеводородов (толуол и бензол)

были получены для совпадающего и взаимно противоположных направлений естественного и вынужденного движений.

При ламинарном режиме вынужденного движения жидкости в условиях сверхкритических давлений и для случая, когда направления свободного и вынужденного движений взаимно перпендикулярны, отсутствуют не только расчетные уравнения теплоотдачи, но и первичные опытные данные для других жидкостей. Поэтому при обобщении будем ограничиваться данными по теплоотдаче толуола и *n*-гептана из [3–6] в следующих интервалах изменения режимных параметров процесса:

$$\begin{aligned} p &= (1,096\dots 2,558)p_{кр}; & T_{ж} &= (0,52\dots 0,94)T_{кр}; \\ T_c &= (0,56\dots 2,00)T_{кр}; & \rho W &= 150\dots 600 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}); \\ q &= 10^4\dots 1,2 \cdot 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2 & \text{и } Gr &= 8 \cdot 10^3\dots 5 \cdot 10^6. \end{aligned}$$

Экспериментальные данные получены на установке, описанной в [7]. Опытным участком являлась труба из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с внутренним диаметром 2...5 мм, толщиной стенки 0,28...0,46 мм и обогреваемой длиной до 500 мм. В исследованиях при определении коэффициента теплоотдачи максимально возможная относительная погрешность составляла  $\pm 19,15$  %, а среднеквадратичная –  $\pm 14,01$  %.

На примере многочисленных экспериментальных исследований доказано, что в области  $t_c \approx t_m$  и  $t_c \gg t_m$  наступает режим с улучшенной теплоотдачей, характеризуемый постоянством или медленным ростом температуры охлаждаемой поверхности стенки трубы по мере повышения плотности теплового потока. Установлено, что в рассматриваемой области коэффициент теплоотдачи увеличивается более чем в 2...3 раза по сравнению с обычными условиями [3–6].

Известно, что, в отличие от вертикальной, при движении жидкости в горизонтальной трубе под влиянием естественной конвекции возникает поперечная циркуляция жидкости. При ее нагревании у стенки появляются восходящие и нисходящие токи в середине трубы, в результате жидкость движется как бы по винтовой линии, и за счет лучшего ее перемешивания коэффициент теплоотдачи в среднем увеличивается. Поэтому при прочих равных условиях его значение при движении жидкости в горизонтальной трубе больше, чем при совпадении направления вынужденного и свободного движений. Если учесть условия проводимых нами исследований и дополнительные факторы, характерные для сверхкритической области (например, сильные и своеобразные изменения теплофизических свойств исследуемой жидкости), влияющие на ход процесса и осложняющие механизм теплообмена, то можно заключить, что разработка расчетных рекомендаций для оценки интенсивности конвективной теплоотдачи при ламинарном режиме вынужденного движения жидкости в горизонтальной трубе в условиях сверхкритических давлений является достаточно сложной задачей. Следует подчеркнуть, что сказанное относится как к ламинарному, так и к другим режимам вынужденного и свободного движений жидкости при сверхкритических давлениях.

На рис. 1 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

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

Для удобства (1) можно записать в виде

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

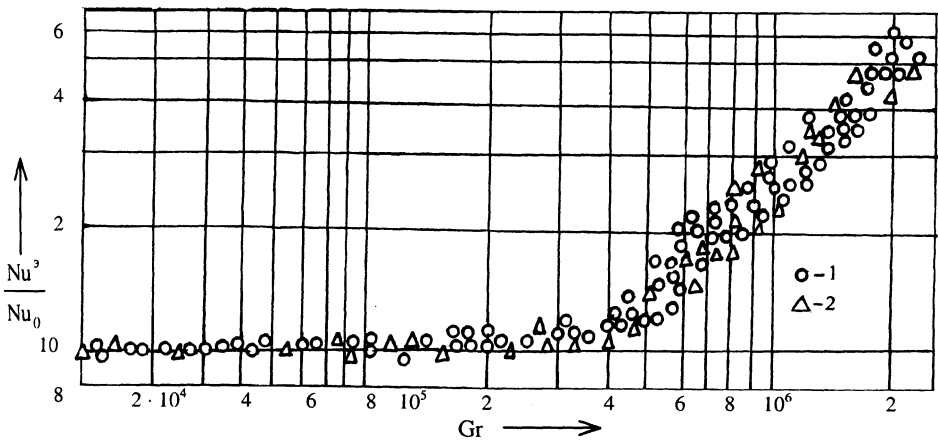


Рис. 1. 1 – толуол; 2 – н-гептан

Как видно из рис. 1, указанный график можно разделить на две части:

$$Gr < 4 \cdot 10^5 \text{ и } Gr > 4 \cdot 10^5 .$$

На первой части указанного графика ( $Gr < 4 \cdot 10^5$ ) влияние свободной конвекции на характер изменения теплоотдачи не заметно, и локальные значения коэффициента теплоотдачи могут определяться по (1).

При значении  $Gr > 4 \cdot 10^5$  экспериментальные данные по локальному значению коэффициента теплоотдачи описываются критериальным уравнением

$$Nu_{ж, d} = 0,135 Re_{ж, d}^{0,50} Pr_{ж}^{0,43} (Gr \cdot 10^{-5})_{ж, d} \left( \frac{d}{X} \right)^{0,40} , \quad (3)$$

где критерий Грасгофа, согласно [8], определяется как

$$Gr = g(\rho_{ж} - \rho_{c}) \rho_{ж} \frac{d^3}{\mu_{ж}^2} . \quad (4)$$

Критериальные зависимости (1) и (3) описывают показатели теплоотдачи органических теплоносителей (толуол, н-гептан) соответственно при вязкостном и вязкостно-гравитационном режимах в пределах погрешности опыта.

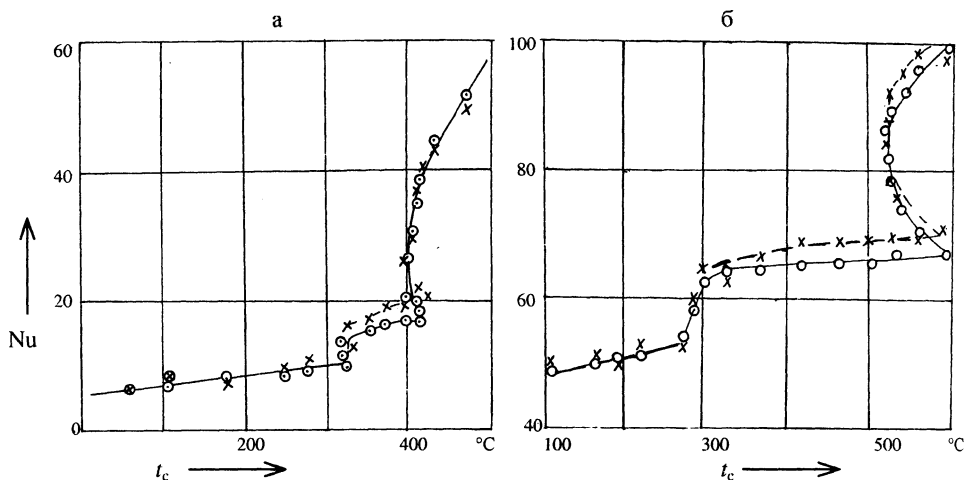


Рис. 2. Зависимость  $Nu = f(t_c)$ : а – для толуола; б – н-гептана;  
 —○— — эксперимент; —×— — расчет по (1) и (3)

В качестве примера результаты некоторых вычислений по указанным выше уравнениям представлены на рис. 2а и б соответственно для толуола и н-гептана.

#### ЛИТЕРАТУРА

- И с а е в Г. И. Влияние свободной конвекции на теплоотдачу при ламинарном течении и сверхкритическом давлении ароматических углеводородов // Нефть и газ... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1982. – № 11. – С. 55–58.
- И с а е в Г. И., А б д у л л а е в а Г. К. Теплоотдача органических теплоносителей // Тез. докл. всесоюз. конф. «Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации». – Рига, 1988. – Т. 1. – С.192–194.
- И с а е в Г. И. и др. Теплоотдача к среде сверхкритических параметров // Нефть и газ... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1997. – № 1–2. – С. 49–51.
- И с а е в Г. И. и др. Температурный режим и теплоотдача в горизонтальных и парогенерирующих трубах при сверхкритическом давлении // Тез. докл. I междунар. науч. конф. «Охрана жизнедеятельности». – Сумгаит, 1998. – С. 138.
- Г у с е й н о в Т. А., И с а е в Г. И. и др. Теплоотдача при ламинарном режиме течения органических теплоносителей в условиях сверхкритических давлений // Нефть и газ... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1997. – № 3–4. – С. 27–29.
- И с а е в Г. И. и др. Теплообмен в условиях переменности теплофизических параметров // Тез. докл. IX теплофизич. конф. СНГ. – Махачкала, 1992. – С. 128.
- И с а е в Г. И. Исследование теплоотдачи при вынужденном движении н-гептана и околокритическом давлении жидкости // Промышленная теплотехника. – 1981. – № 4. – Т. 3. – С. 33–37.
- И к р я н н и к о в Н. П., П е т у х о в Б. С., П р о т о п о п о в В. С. К расчету теплоотдачи в однофазной околокритической области при вязкостно-инерционно-гравитационном течении // ТВТ. – 1973. – № 5. – Т. 11. – С. 1068–1075.

Представлена кафедрой  
 ПТЭ и ТВ

Поступила 30.01.2001