

УДК 536.24

**РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ  
ОПУСКНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ****ИСАЕВ Г.И., ТАГИЕВА З.Г., МАМЕДОВ Ш.Г., ЭЙЮБОВА К.С.,  
РАМАЗАНОВА С.Д.***Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия*

В статье приведены некоторые результаты экспериментальных исследований теплоотдачи н-гептана в условиях сверхкритических давлений и разработаны рекомендации для оценки интенсивности теплообмена, как при вязкостном, так и вязкостно-гравитационном режимах.

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

Указанные обстоятельства потребовали расширения области исследований в условиях сверхкритических давлений теплоносителей.

В этой связи, 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 движения взаимно противоположны (опускное движение жидкости).

Основные преимущества углеводородов заключаются в том, что они обладают сравнительно низкой величиной критического давления (например, для н-гептана,  $P_{кр}=2,736$  МПа), не вызывают коррозию конструкционных материалов и в литературе неоднократно рассматривались возможности осуществления одноконтурных схем с органическими веществами в атомной энергетике и высказывались идеи использования в реакторе различных углеводородов. Кроме сказанного теплофизические свойства н-гептана подробно исследованы в широком интервале изменения давления и температур [1]. Наличие данных по теплофизическим свойствам веществ необходимо для анализа и обобщения полученных результатов.

Процесс теплоотдачи исследовался на экспериментальной установке, представляющей собой разомкнутый циркуляционный контур, изготовленный из нержавеющей стали. Подробное описание установки и методика проведения опытов даны в [2]. Основной элемент установки – экспериментальная труба, изготовленная из нержавеющей стали марок 12X18H10T и 0X18H10T, 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 и понижающего трансформаторов. При определении коэффициента теплоотдачи максимально-возможная относительная

погрешность составляла 19%, а среднеквадратичная – 14%. В исследованиях режимные параметры процесса охватывали следующий интервал изменения:

$$\begin{aligned}
 P &= (1,09 \dots 3,00)P_{кр}; & t_{ж} &= (0,03 \dots 1,04)t_{кр}; \\
 t_c &= (0,11 \dots 2,62)t_{кр}; & Re_{ж,d} &= 500 \dots 3200; \\
 Gr_{ж,d} &= 10^4 \dots 10^6; & q &= 10^4 \dots 2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2
 \end{aligned}$$

Вопрос проектирования и создания современных высоконапряженных теплообменных систем в первую очередь требует достоверную информацию о закономерностях распределения температуры теплоотдающей поверхности стенки канала. В этой связи, прежде всего, рассмотрим график зависимости  $t_c=f(x)$ . Указанная зависимость представлена на рис.1. Эти графики построены по результатам экспериментальных данных полученных для случая взаимно противоположности направлений естественного и вынужденного движений в условиях  $P=4,0\text{МПа}$ ,  $t_{ж}^{BX}=10^0\text{C}$ ,  $\rho W=250 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ . Из рисунка видно, что при температуре стенки ниже псевдокритической температуры исследуемой жидкости ( $t_m=295^0\text{C}$ ) характер распределения температуры теплоотдающей поверхности стенки трубы такой же как и при обычном конвективном теплообмене, имеющем место при докритических давлений (кривые 1...3).

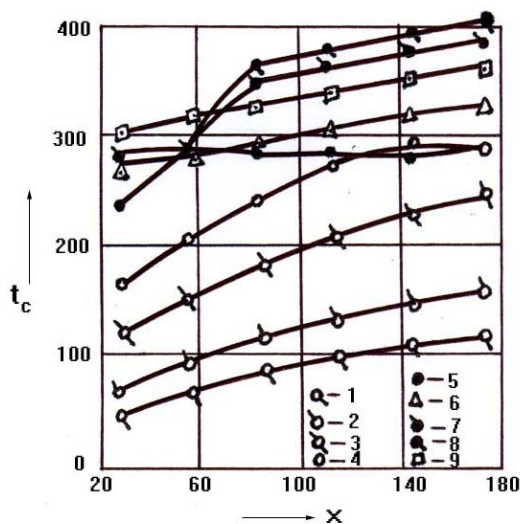


Рис. 1. Зависимость  $t_c=f(x)$  1 –  $q=0,298 \cdot 10^5$ ; 2 –  $0,409 \cdot 10^5$ ; 3 –  $0,670 \cdot 10^5$ ; 4 –  $0,890 \cdot 10^5$ ; 5 –  $1,216 \cdot 10^5$ ; 6 –  $1,627 \cdot 10^5$ ; 7 –  $2,063 \cdot 10^5$ ; 8 –  $2,139 \cdot 10^5$ ; 9 –  $3,824 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ ;  $t_c, ^0\text{C}$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

По мере увеличения плотности теплового потока температура теплоотдающей поверхности стенки трубы возрастая приближается к псевдокритической температуре исследуемой жидкости и при этом в результате резкого изменения теплофизических свойств (особенно  $C_p$  и  $\rho$ ) в пристеночном слое наблюдается некоторое нарушение монотонности распределения температуры стенки вдоль канала. Например, при значении плотности теплового потока равной  $0,890 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$  температура теплоотдающей поверхности стенки трубы на расстояниях  $x=30 \dots 116 \text{ мм}$  возрастает от  $t_c=175,5^0\text{C}$  до  $t_c=280,3^0\text{C}$ , а в конечной части её остается неизменной и равной  $294^0\text{C}$  (кривая 4). При значении же плотности теплового потока  $q=1,246 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$  температура теплоотдающей поверхности стенки трубы на расстоянии  $x \geq 88 \text{ мм}$  от входа остается приблизительно постоянной и равной  $287^0\text{C}$  (кривая 5). Таким образом, для таких режимов характерно то, что с последующим увеличением плотности теплового потока  $t_c$  остается практически неизменной и экспериментальные точки,

полученные при различных значениях  $q$ , сливаются, что свидетельствуют о наступлении улучшенного режима теплоотдачи. В рассматриваемом случае режим с улучшенной теплоотдачей охватывает интервал изменения плотности теплового потока от  $0,890 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$  до  $1,627 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ . Однако следует подчеркнуть, что 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 ослаблению интенсивности теплообмена в области  $t_c \approx t_m$  [2...5].

Как показывают результаты исследований в определенном интервале изменения плотности теплового потока ( $q = 1,627 \cdot 10^5 \dots 2,140 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ ) температура теплоотдающей поверхности стенки трубы возрастает и при этом наступает относительно ухудшенный режим теплоотдачи (кривые 6...8). При больших значениях плотности теплового потока и высокой температуре теплоотдающей поверхности стенки трубы обнаружено снижение температуры стенки вплоть до  $t_c \approx t_m + 30^\circ\text{C}$  (кривая 9).

В интервале изменения плотности теплового потока от  $2,139 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$  до  $3,824 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$  в отдельных сечениях канала температура охлаждаемой поверхности стенки имеет приблизительно одинаковую величину, 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  $t_c = f(q)$  представленного на рис.2, который построен по показаниям термопар, расположенных на расстоянии  $x = 110 \text{ мм}$  от входа в трубу, по результатам проведенных исследований при  $P = 4,0 \text{ МПа}$ ,  $t_{\text{ж}}^{\text{вх}} = 10^\circ\text{C}$ ,  $\rho W = 250 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ . Следует заметить, что указанная зависимость претерпевает многократные изменения и при этом в области  $t_c \geq t_m$  коэффициент теплоотдачи увеличивается больше чем 2-3 раза по сравнению с обычными условиями.

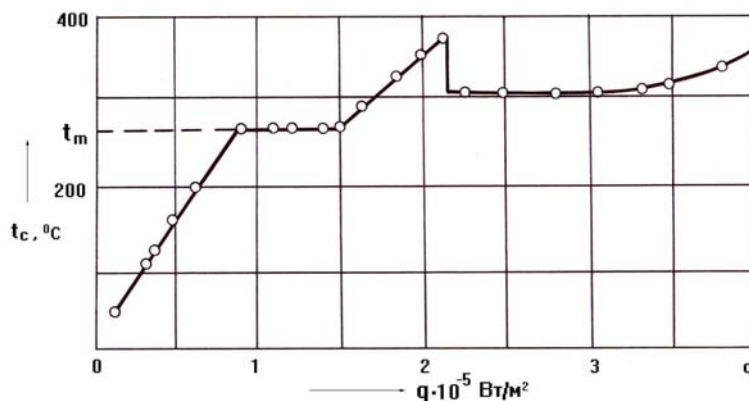


Рис.2. Зависимость  $t_c = f(q)$

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

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

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

Уравнение (1) можно представить в виде

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

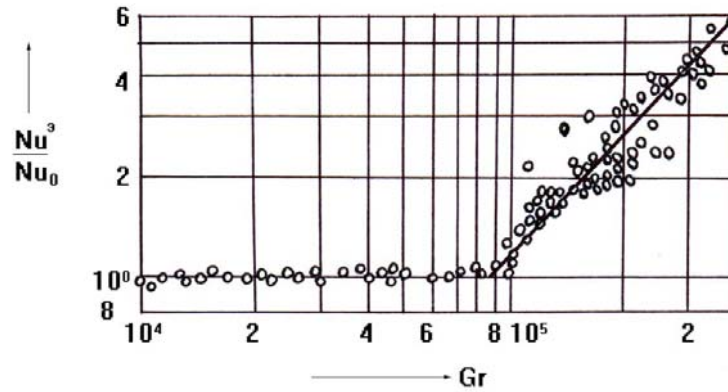


Рис.3. Зависимость  $\frac{Nu^3}{Nu_0^3} = f(Gr)$

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 не заметно, и локальные значения коэффициента теплоотдачи могут быть определены по уравнению (2). При  $Gr > 10^5$  экспериментальные данные по локальному значению коэффициента теплоотдачи описываются критериальным уравнением

$$Nu_{ж.(x)d} = 0,405 Re_{ж.(x)d}^{0,50} \cdot Pr_{ж.(x)}^{0,43} \left( Gr \cdot 10^{-5} \right)_{ж.(x)d}^{1,15} \left( \frac{d}{x} \right)^{0,40} \quad (3)$$

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

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

где согласно [7]

$$Gr = g(\rho_{ж} - \rho_{c}) \rho_{ж} \cdot \frac{d^3}{\mu_{ж}^2} \quad (5)$$

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

#### Выводы

1. Исследован температурный режим стенок вертикальных труб при опускном ламинарном движении н-гептана в условиях сверхкритических давлений. Установлено, что при условии  $t_c \geq t_m$  температура стенки, как по длине канала, так и в зависимости от плотности теплового потока изменяется немонотонно.

2. Предложены критериальные уравнения, позволяющие оценить интенсивность теплообмена при вязкостном и вязкостно-гравитационном режимах.

#### Обозначения

$C_p$  - изобарная теплоемкость,  $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$ ;  $d$  - внутренний диаметр трубы, мм;

$Gr$  - критерий Грасгофа;  $g$  - ускорение свободного падения,  $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;

$Nu$  - критерий Нуссельта;  $P$  - давление, МПа;  $Pr$  - критерий Прандтля;

$P_{кр}$  - критическое давление, МПа;  $q$  - плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$Re$  - критерий Рейнольдса;  $t_{ж}$  - температура жидкости  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{ж}^{вх}$  - температура жидкости на входе,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_c$  - температура внутренней поверхности стенки,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_m$  - псевдокритическая температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $W$  - средняя скорость жидкости, м/с;

$x$  - расстояние от входа трубы, мм;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$\mu$  - динамическая вязкость,  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ ;  $\rho$  - плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho W$  - массовая скорость  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

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

1. Григорьев Б.А. Дис.д-ра.техн.наук, Грозный, ГНН, 1979.
2. Исаев Г. И. // Промышленная теплотехника.1981.Т.3, № 4, с.33-37.
3. Исаев Г. И. // Изв.вузов. Нефть и газ, 1981, №2, с.67-72
4. Исаев Г. И., Арабова И. Т., Мамедов Ф. Х. // Изв. вузов. Энергетика.1991. № 2, С.116 – 120.
5. Исаев Г. И., Алиева С. Х., Эйюбова К. С., Велиева Ш. А. // ИФЖ. 2001. Т. 74. № 5, С. 78 - 80.
6. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача – М.: Энергоиздат, 1981.
7. Икрянинов Н. П., Петухов Б. С., Протопопов В. С. // ТВТ. 1973. Т.11, № 5, С.1068 – 1075.

## MAYENİN ÜZÜ AŞAĞI HƏRƏKƏTİNDƏ İSTİLİKVERMƏNİN İNTENSİVLİYİNİ QIYMƏTLƏNDİRMƏK ÜÇÜN TÖVSIYYƏLƏR

**İSAYEV H.İ., TAGIYEVA Z.H., MƏMMƏDOV Ş.H., EYYUBOVA K.S.,  
RAMAZANOVA S.C.**

n-qeptanın istilikverməsinin təcrübi nəticələri əsasında istilikvermənin intensivliyini həm özlülü və həm də özlülü-qravitasion rejimlərdə qiymətləndirmək üçün tövsiyyələr işlənmişdir.

### GUIDELINE FOR ESTIMATION OF HEAT EXCHANGE INTENSITY IN DOWN FLOW MOVEMENT OF LIQUID

**ISAYEV G.I., TAGIYEVA Z.Q., MAMEDOV Sh.H., EYYUBOVA K.S.,  
RAMAZANOVA S.D.**

On the base of experimental data of heat exchange of n-heptane the guidelines for evaluation of intensity of heat exchange were developed as for viscous rate, so as for viscous-gravitational rate.