

УДК 536.242.08.

ТЕПЛООТДАЧА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗМЕЕВИКЕ ПРИ СКД ТОЛУОЛА

КАЛБАЛИЕВ Ф.И., МАМЕДОВА Д.П., СУЛТАНОВ Р.А., ТАВАКУЛИ Д.

Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия

Приведены результаты экспериментального исследования теплоотдачи холодного и нагретого толуола СКД при переходном и турбулентном режимах движения в вертикальных змеевиках. Установлено неравномерное распределение температуры стенки по сечению змеевика. Результаты исследования теплоотдачи обобщены критериальными уравнениями.

На практике часто встречаются теплообменные аппараты с изогнутыми трубами. Однако теплоотдача при движении жидкости при сверхкритических давлениях (СКД) в изогнутых трубах изучена мало. Для создания новых перспективных конструкций необходимы данные по температурному режиму змеевика. В связи с этим в настоящей работе изучалась теплоотдача в вертикальном змеевике с холодным и нагретым толуолом.

Опыты проводились на экспериментальной установке, работающей по принципу разомкнутого циркуляционного контура [1]. Экспериментальные участки (рис.1) являются вертикальными змеевиковыми трубами из нержавеющей стали IX18H10T с внутренним диаметром 1,91-7,6 мм средним диаметромгиба $D_{cp}=28-109$ мм, которые обогреваются электрическим током низкого напряжения.

Длина обогреваемой части трубы 240-710 мм. Во время опыта измерялись сила и напряжение тока, расход, давление и температура жидкости, а также температура наружной поверхности стенки. Опыты проводились при различных температурах жидкости на входе в трубу. При этом толуол предварительно нагревался до необходимой температуры.

Термопары располагались в различных сечениях, как по внутреннему и наружному периметрам змеевика, так и на прямых участках трубы.

На рис.2. показано изменение температуры стенки по длине змеевика при подъемном движении толуола. Результаты опытов показывают, что при одинаковых тепловых потоках температура внутренней поверхности трубы всегда больше, чем наружной. В прямой части трубы (на входной и выходной части змеевика) температура стенки больше, чем в изогнутой части. После входа жидкости в изогнутую часть трубы температура стенки вначале уменьшается, затем – вновь возрастает.

При движении жидкости в изогнутом сечении трубы возникают центробежные силы и на внутренней стороне сечения образуется ламинарный пограничный слой, который способствует увеличению термического сопротивления и соответственно повышению температуры стенки на поверхности. На наружной стороне змеевика этот слой разрушается. В результате этого изменяется интенсивность теплоотдачи по сечению трубы и соответственно наблюдается неравномерное распределение температуры стенки по сечению змеевика.

На рисунке стрелками показаны области, где начинается пульсация давления жидкости и температуры стенки. В пульсационном режиме температура стенки падает. (Снижение температуры стенки показано стрелками).

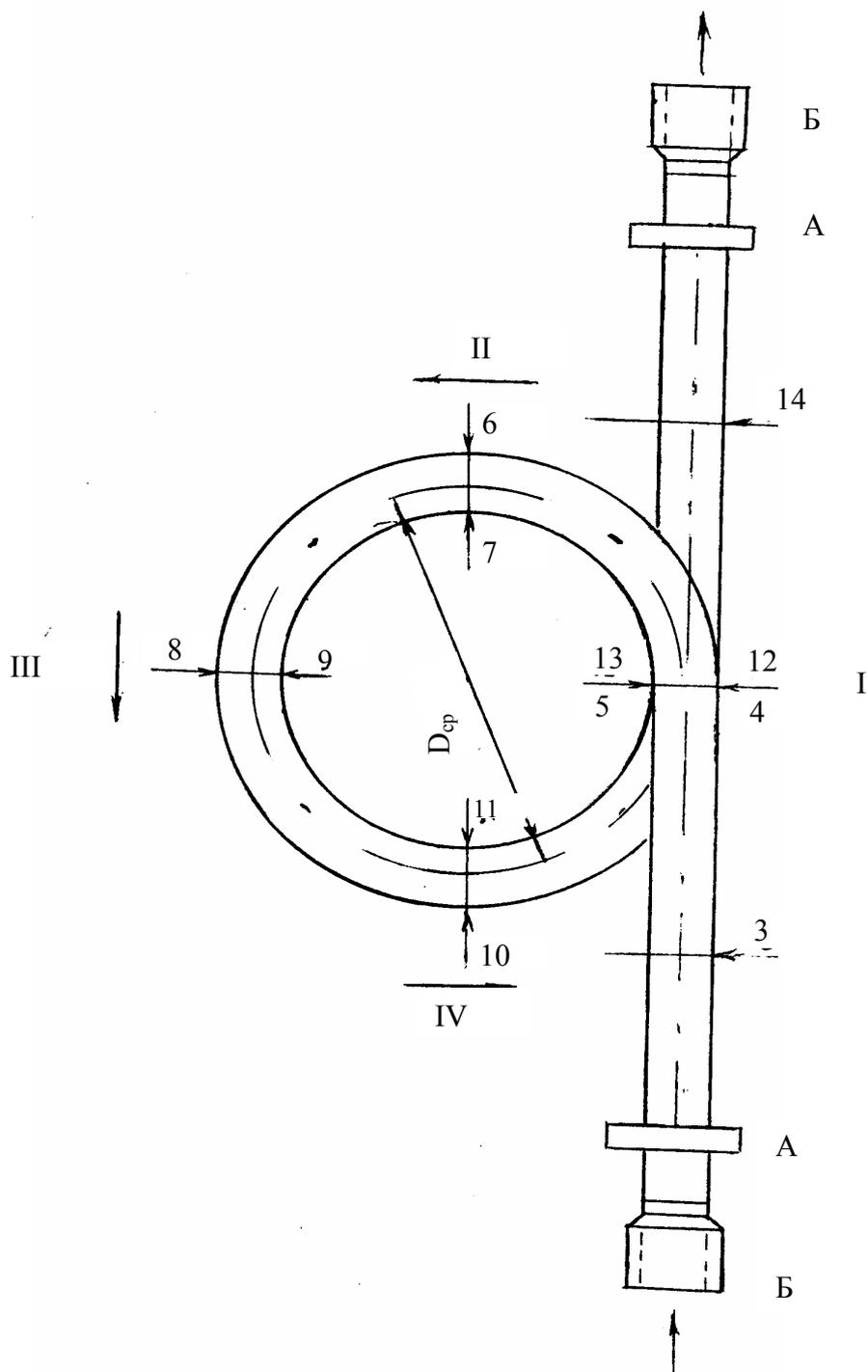


Рис.1. Схема экспериментального участка

Б – смесительные камеры; А - токоподводы; 3,14 - термопары, расположенные на прямой части обогреваемого участка; 5, 7, 9, 11, 13-термопары, расположенные на внутреннем периметре змеевика; 4, 6, 8, 10, 12-термопары, расположенные на наружном периметре змеевика

а)

б)

Рис.2. Изменение температуры стенки по длине обогреваемого участка при $P=5,6$ МПа; $\rho u=700\text{кг/м}^2\text{с}$; $D_{\text{ср}}=46,2$ мм; $q \cdot 10^{-5}\text{Вт/м}^2$: 1-2,01; 2-3,45; 3-6,50; 4-8,80; 5-9,10; а) - для внутреннего периметра змеевика; б) – для наружного периметра змеевика.

Движение жидкости в змеевике с вертикальным расположением имеет свои особенности. При движении жидкости снизу вверх (рис.1) в правой части змеевика имеет место подъемное, в левой - опускное, а в нижней и верхней частях горизонтальное движение. Таким образом, по направлению движения жидкости виток змеевика условно можно разделить на четыре части. Очевидно, между этими частями змеевика имеются переходные зоны, в которых одно направление движения переходит в другое. При околокритическом состоянии вещества сильные изменения теплофизических свойств способствуют возникновению свободной конвекции при движущейся жидкости. Направления вынужденной и свободной конвекции на этих участках змеевика могут быть различными. На участках змеевика с подъемным движением направление вынужденной и свободной конвекций совпадают. На горизонтальном участке эти направления движения перпендикулярны, а на участках с опускным движением - противоположны. Соответственно этому изменяется интенсивность теплообмена, что отражается на изменении температуры стенки змеевика.

На рис.3. представлены графики изменения температуры стенки по длине трубы с нагретым толуолом при турбулентном режиме движения. Из рис.3. видно, что температура стенки по длине трубы изменяется неравномерно. На расстоянии 120 мм от входа в экспериментальную трубу t_c с малой разностью увеличивается. Эта разность температур еще более возрастает от конца прямого участка до начала криволинейной части трубы.

Рис.3. Изменение температуры стенки по длине обогреваемого участка при $P=5\text{МПа}$; $\rho u=468,3\text{кг/м}^2\text{с}$; $D_{\text{ср}}=80\text{ мм}$; $t_{\text{жс}}^{\text{вх}} = 160^{\circ}\text{C}$; $\text{Re}^{\text{вх}} = 1,9 \cdot 10^4$; $q \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$: 1-5,97; 2-11,47; 3-12,51
для внутреннего периметра змеевика (пунктирная линия) и для наружного периметра змеевика (сплошная линия)

Анализ экспериментальных данных показывает, что при $t_c > 200^{\circ}\text{C}$ на интенсивность теплоотдачи сильно влияет свободная конвекция. Влияние свободной конвекции на теплоотдачу зависит от многих факторов, в том числе от направления течения жидкости. На разных участка змеевиковой трубы влияние свободной конвекции на теплоотдачу оказывается различным. Поэтому на каждом участке расчет теплоотдачи нужно вести по разным уравнениям.

Эксперименты, проведенные с холодным толуолом при СКД в изогнутых трубах при переходном режиме движения ($1500 \text{ Re} < 10000$), для прямой части трубы до входа в змеевик, хорошо описываются уравнением [3].

$$Nu_{ж,d} = 0,047 \text{Re}_{ж,d}^{0,70} \cdot \text{Pr}_{ж}^{0,43} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_c}\right)^{0,20} \left(\frac{x}{d}\right)^{-0,15} \quad (1)$$

После змеевика в прямом участке экспериментальные данные в турбулентном режиме движения описываются уравнением [1].

$$Nu_{ж,d} = 0,021 \text{Re}_{ж,d}^{0,80} \cdot \text{Pr}_{ж}^{0,43} \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_c}\right)^n, \quad (2)$$

где $n=0,25$ при $t_c > t_m$; $n=0,5$ при $t_c = t_m$.

Экспериментальные данные по теплоотдаче, полученные для внутреннего и наружного периметров в вертикальной змеевиковой трубе при переходном режиме движения ($2200 < \text{Re}_{ж,d} < 10^4$) и $t_c < 200^{\circ}\text{C}$, обобщаются уравнением [4].

$$Nu_{ж,d} = A \cdot \varepsilon \text{Re}_{ж,d}^{0,70} \cdot \text{Pr}_{ж}^{0,43} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_c}\right)^{0,20}, \quad (3)$$

где $A = \begin{cases} 0,050; \varepsilon = 1 + 0,36 d_g / D_{cp} & \text{для внутреннего периметра,} \\ 0,064; \varepsilon = 1 + 3,54 d_g / D_{cp} & \text{для наружного периметра.} \end{cases}$

Существенное влияние свободной конвекции на теплоотдачу наблюдается при $t_c > 200^{\circ}\text{C}$ и $\text{Gr}_{ж,d} \geq 10^5$.

На втором и третьем участках змеевика (рис.1) влияние свободной конвекции на интенсивность теплоотдачи отрицательно. На этих участках данные по теплоотдачам обобщаются уравнением.

$$Nu_{ж,d} = A \cdot \varepsilon \text{Re}_{ж,d}^{0,70} \cdot \text{Pr}_{ж,d}^{0,43} \cdot \text{Cr}_{ж,d}^{-0,10}, \quad (4)$$

где $A = \begin{cases} 0,195 & \text{- для внутреннего периметра,} \\ 0,240 & \text{- для наружного периметра.} \end{cases}$

На четвертом участке змеевика влияние свободной конвекции на интенсивность теплоотдачи положительно и данные по теплоотдаче описываются уравнением

$$Nu_{ж,d} = A \cdot \varepsilon Re_{ж,d}^{0,70} \cdot Pr^{0,43} \cdot Cr_{ж,d}^{0,10}, \quad (5)$$

где $A = \begin{cases} 0,016 - \text{ для внутреннего периметра,} \\ 0,020 - \text{ для наружного периметра.} \end{cases}$

-
1. *Калбалиев Ф.И.* «Теплоотдача при сверхкритических давлениях вещества». (Ароматические углеводороды). Дис.....д.т.н.–Баку 1985.с.416.
 2. *Калбалиев Ф.И., Мамедова Д.П., Султанов Р.А.* «Температурный режим змеевиковых труб энергетических установок при сверхкритических давлениях вещества». Респ.науч.-практ.конф.посв.80-летию АГНА. 2000, с.125-127.
 3. *Калбалиев Ф.И., Мамедова Д.П.* «Теплоотдача при переходном режиме движения и СКД ароматических углеводородов». Нефть и газ, 1985, №8, с.62-66.
 4. *Калбалиев Ф.И., Мамедова Д.П., Мусаев И.В.* «Теплоотдача в змеевиковых трубах при переходном режиме движения и СКД толуола» Нефть и газ, 1992, №2, с51-53.

ŞAQLI İLANVARI BORULARDA TOLUOLUN KRİTİK DƏN YÜKSƏK TƏZYİQLƏRİNDƏ İSTİLİKVERMƏ

KƏLBƏLİYEV F.İ., MƏMMƏDOVA C.P., SULTANOV R.A., TAVAKULİ D.

Şaquli ilanvari boruda, keçid və turbulent rejimli hərəkətlərdə soyuq və isti toluolla istilikvermə prosesinin təcrübi tədqiqatlarının nəticələri verilmişdir. Təyin edilmişdir ki, ilanvari borunun səthi boyu temperatur qeyri-bərabər paylanır. Təcrübənin nəticələri kriterial tənliklər şəklində ümumiləşdirilmişdir.

HEAT TRANSFER IN VERTICAL COIL AT SUPER CRITICAL PRESURES TOLUOL

KALBALIYEV F.I., MAMEDOVA D.P., SULTANOV R.A., TAVAKULI D.

The results of an experimental research heat transfer cold and heated up toluol SCP are spent at transitive and turbulent modes of movement in vertical coil. Temperature of a wall on section coil is established non-uniform distribution. The results of research heat transfer are generalized criteria by the equations.