

УДК 621.695 (088.8)

## ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПНЕВМОПРОВОДЕ ЭРЛИФТНОЙ УСТАНОВКИ С ПАРОСТРУЙНЫМ КОМПРЕССОРОМ

Кононенко А.П. канд. техн. наук, доц.,  
Мизерный В.И. инженер, Мизерный А.В. бакалавр,  
Донецкий государственный технический университет

*Получено критериальное уравнение, описывающее теплообменные процессы между паровоздушной смесью, используемой в качестве рабочего тела в эрлифтной установке с пароструйным компрессором, и зумпфовой водой.*

*The equation of criterion describing processes of exchange of heat between mixture pair and air, used is obtained as a working body in air-lifts system with the ink compressor working on pair, and water by zumpf.*

В качестве источников пневмоэнергии для эрлифтов систем гидрозолошлакоудаления тепловых электростанций могут применяться пароструйные компрессоры. Между пароструйным компрессором и смесителем эрлифта имеется участок пневмопровода, находящийся в зумпфе установки и омываемый снаружи транспортируемой гидросмесью. Тепломассообменные процессы на данном участке вызывают изменение состояния паровоздушной смеси.

Необходимость определения параметров паровоздушной смеси на входе в смеситель эрлифта по известным параметрам исходной смеси после пароструйного компрессора потребовала проведения анализа и установления закономерностей теплообменных процессов в пневмопроводе эрлифтной установки.

Анализ проведен по результатам экспериментальных исследований эрлифтной установки с пароструйным компрессором Экиба-стузской ГРЭС-1 и расчета теплового баланса рассматриваемой системы [1]. В результате выявлена зависимость относительного количества тепловой энергии, передаваемой от паровоздушной смеси к воде в зумпфе, от начального воздухосодержания смеси. Для исследованных условий, уменьшение начального массового воздухосодержания смеси от  $\varepsilon_{60} = 0,54$  до  $\varepsilon_{60} = 0,36$  ведет к увеличению относительного количества передаваемой тепловой энергии с 8% до 30÷35%.

Конденсация перегретого водяного пара из состава паровоздушной смеси в пневмопроводе не происходит, во всем исследованном диапазоне относительных погружений смесителя  $\alpha=0,103 \div 0,361$  (при длине подъемной трубы  $H+h=36\text{м}$ ), при начальных воздухосодержаниях смеси  $\varepsilon_{60} > 0,42$ .

Полученные данные можно распространить на эрлифтные установки с условиями работы, аналогичными условиям проведения экспериментальных исследований:

- скорость воды в зумпфе –  $0,04 \div 0,10$  м/с;
- скорость паровоздушной смеси в пневмопроводе -  $40 \div 130$  м/с;
- геометрические глубины погружения эрлифта –  $3,5 \div 13$  м;
- температура исходного рабочего пара –  $450 \div 500^\circ \text{С}$ .

Вопросы теплообмена смесей паров с неконденсирующимися газами исследовали ученые Берман Л.Д., Кутателадзе С.С., Исаченко В.П., Осипова В.А., Михеева М.А. и другие [2-3]. Однако зависимости для определения коэффициентов тепло- и массообмена от паровоздушной смеси с массовым воздухосодержанием  $\varepsilon_{60} > 0,3$  при движении внутри цилиндрической трубы диаметром  $0,2 - 0,3$  м, что имеет место для пневмопроводов эрлифтных установок, отсутствуют.

Критериальные уравнения для коэффициентов теплообмена и массообмена для условий совместно протекающих процессов тепло- и массообмена в гетерогенных (разнофазных с поверхностями раздела) системах, поверхность раздела которых непроницаема для инертного компонента, приведены в [4]. Данные уравнения имеют вид

для теплообмена

$$Nu = f \left( Re, Ar, Pr, Pr_D, \Pi g, r_r, \frac{C_{pn}}{C_{pr}}, \frac{R_{II}}{R_r} \right); \quad (1)$$

для массообмена

$$Nu_D = f \left( Re, Ar, Pr_D, \Pi g, r_r, \frac{R_{II}}{R_r} \right), \quad (2)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;

$Re$  – критерий Рейнольдса;

$Ar$  – критерий Архимеда;

$Pr$  – критерий Прандтля;

$Nu_D$  – диффузионный критерий Нуссельта;

$Pr_D$  – диффузионный критерий Прандтля;

$r_r$  – объемное содержание инертного компонента в смеси;

$C_{pn}, C_{pr}$  – теплоемкость соответственно активного и инертного компонентов смеси;

$R_{II}, R_r$  – газовые постоянные соответственно активного и инертного компонентов смеси;

$Pg$  – критерий, определяемый отношением разности парциальных давлений активного компонента в основной массе (ядре потока) и у поверхности раздела к давлению газовой смеси.

Согласно данным экспериментальных исследований, при начальных воздухосодержаниях паровоздушной смеси  $\varepsilon_{\text{в0}} \geq 0,42$ , что представляет практический интерес, конденсация пара из состава смеси в пневмопроводе отсутствует, а в диапазоне  $0,36 \leq \varepsilon_{\text{в0}} \leq 0,42$  фазовым превращениям подвергается не более 20% от начального количества водяного пара. Поэтому процессы в пневмопроводе рассмотрены как обычные теплообменные без учета влияния массопередачи.

Критериальное уравнение для коэффициента теплоотдачи от паровоздушной смеси к внутренней стенке пневмопровода получены из зависимости (1), исключив из нее аргументы, описывающие массообменные потоки вещества:

$$Nu = f \left( Re, Pr, r_r, \frac{C_{pn}}{C_{pr}}, \frac{R_{II}}{R_r} \right). \quad (3)$$

Учитывая, что для паровоздушной смеси

$$\frac{C_{pn}}{C_{pr}} = const, \quad \frac{R_{II}}{R_r} = const, \quad r_r = r_{\text{в}},$$

окончательно имеем

$$Nuc = f(Re_c, Pr_c, r_{\text{в}}), \quad (4)$$

где  $Nuc, Re_c, Pr_c$  – соответственно критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля для паровоздушной смеси.

Снаружи пневмопровод в продольном, совпадающем с движением паровоздушной смеси, направлении омывается водой. Согласно [5], критериальное уравнение, описывающее процесс теплообмена при внешнем омывании капельной жидкостью твердых тел, без учета изменения физических свойств данной жидкости в процессе теплообмена, имеет следующий вид

$$Nuv = f(Re_{\text{в}}, Pr_{\text{в}}), \quad (5)$$

где  $Nuv$ ,  $Re_v$ ,  $Pr_v$  - соответственно критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля для воды.

Как известно, коэффициент теплопередачи от паровоздушной смеси к зумпфовой воде описывается выражением

$$\kappa = f(a_1, a_2, \lambda, s), \quad (6)$$

где  $a_1$  – коэффициент теплоотдачи от паровоздушной смеси к внутренней стенке пневмопровода;

$a_2$  – коэффициент теплоотдачи от наружной стенки пневмопровода к зумпфовой воде;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности стенки пневмопровода;

$s$  – толщина стенки пневмопровода.

Для рассматриваемых условий с достаточной степенью точности можно принять  $\lambda = const$  и  $s = const$ , так как пневмопроводы эрлифтных установок изготавливаются из углеродистых сталей, а толщины стенок этих трубопроводов составляют  $s = 6 \div 8$  мм. Тогда уравнение (6) можно представить в виде

$$\kappa = f(a_1, a_2), \quad (7)$$

а с учетом значения критерия Нуссельта

$$\kappa = f\left(\frac{Nuc \cdot \lambda_c}{\ell_I}, \frac{Nuv \cdot \lambda_g}{\ell_{II}}\right), \quad (8)$$

где  $\lambda_c$ ,  $\lambda_g$  – коэффициенты теплопроводности соответственно паровоздушной смеси и воды;

$\ell_I, \ell_{II}$  - определяющие геометрические размеры.

Так как параметры воды в зумпфе изменяются в незначительных пределах [1], с точностью до 3% справедливо  $\lambda_g = const$ . В качестве определяющего геометрического размера принят средний диаметр пневмопровода

$$\ell_I = \ell_{II} = d_{cp} = \frac{d_{нар} + d_{вн}}{2}, \quad (9)$$

где  $d_{нар}$ ,  $d_{вн}$  – соответственно наружный и внутренний диаметры пневмопровода.

Из уравнения (8)

$$\frac{\kappa \cdot d_{cp}}{\lambda_c} = f(Nuc, Nuv). \quad (10)$$

Обозначив

$$\frac{\kappa \cdot d_{cp}}{\lambda_c} = N_{unh} \quad (11)$$

и подставив в уравнение (10) значения  $N_{uc}$  и  $N_{uv}$  из выражений (4) и (5) получаем критериальное уравнение, описывающее процесс теплопередачи между паровоздушной смесью и зумпфовой водой

$$N_{unh} = f(Re_c, Pr_c, Re_v, Pr_v, r_g). \quad (12)$$

Учитывая, что для газов и газовых смесей критерий Прандтля имеет практически постоянное значение в широком диапазоне изменения параметров состояния и то, что объемное воздухосодержание паровоздушной смеси однозначно определяется ее массовым воздухосодержанием  $r_g = f(\varepsilon_{g0})$ , окончательно имеем

$$N_{unh} = f(Re_c, Re_v, Pr_v, \varepsilon_{g0}). \quad (13)$$

В качестве определяющих температур для паровоздушного потока принята средняя температура смеси на рассматриваемом участке пневмопровода, а для жидкости – средняя температура воды.

В результате обработки экспериментальных данных получено эмпирическое критериальное уравнение:

$$N_{unh} = 4,29 \cdot 10^{-7} \cdot Re_c^{1,807} \cdot Re_v^{-0,720} \cdot Pr_v^{1,048} \cdot \varepsilon_{g0}^{-4,310}, \quad (14)$$

подтвержденное в следующем диапазоне изменения переменных:  $Re_c = (5,7 \div 12,9) \cdot 10^5$  ;  $Re_v = (0,69 \div 2,46) \cdot 10^4$  ;  $Pr_v = 6,21 \div 7,53$  ;  $\varepsilon_{g0} = 0,36 \div 0,545$ . Относительная среднеквадратическая ошибка уравнения регрессии составляет 3,12%.

Список источников.

1. Кононенко А.П. Разработка эрлифтных установок с пароструйными компрессорами. Автореф. дис... канд. техн. наук. – Донецк: ДПИ, 1988. – 24 с.
2. Берман Л.Д., Фукс С.Н. Расчет поверхностных теплообменных аппаратов для конденсации пара из паровоздушной смеси//Теплоэнергетика.-1959. - №7.- с.74-83.
3. Бобе Л.С., Салоухин В.А. Тепло- и массообмен при конденсации пара из парогазовой смеси при турбулентном течении внутри трубы// Теплоэнергетика.-1972. - №9.- с.27-30.
4. Берман Л.Д. О критериях подобия для совместно протекающих процессов тепло- и массообмена в гетерогенных системах//Журнал технической физики.-1958. том XXVIII, вып II.-с.2617-2629.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981.- 417с