

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 $\varepsilon_{80} = 0,54$ до $\varepsilon_{80} = 0,36$ 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 воздухо содержаниях смеси $\varepsilon_{\text{в0}} > 0,42$.

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 тепломассоотдачи 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 массоотдачи от паровоздушной смеси с массовым воздухо содержанием $\varepsilon_{\text{в0}} > 0,3$ при движении внутри цилиндрической трубы диаметром $0,2 - 0,3$ м, что имеет место для пневмопроводов эрлифтных установок, отсутствуют.

Критериальные уравнения для коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи 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

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

для массообмена

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

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;

$Пg$ – 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 $\varepsilon_{80} \geq 0,42$, что представляет практический интерес, конденсация пара из состава смеси в пневмопроводе отсутствует, а в диапазоне $0,36 \leq \varepsilon_{80} \leq 0,42$ 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

$$\frac{C_{pn}}{C_{pr}} = const, \quad \frac{R_{II}}{R_r} = const, \quad r_r = r_8,$$

окончательно имеем

$$Nuc = f(Rec, Prc, r_8), \quad (4)$$

где Nuc, Rec, Prc – 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

$$Nuv = f(Re_v, Pr_v), \quad (5)$$

где $N_{ив}$, 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;

λ - 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

$$\kappa = f\left(\frac{N_{ис} \cdot \lambda_c}{l_I}, \frac{N_{ив} \cdot \lambda_v}{l_{II}}\right), \quad (8)$$

где λ_c , λ_v - коэффициенты теплопроводности соответственно паровоздушной смеси и воды;

l_I, l_{II} - определяющие геометрические размеры.

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

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

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

Из уравнения (8)

$$\frac{\kappa \cdot d_{cp}}{\lambda_c} = f(N_{ис}, N_{ив}). \quad (10)$$

Обозначив

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

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

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

Учитывая, что для газов и газовых смесей критерий Прандтля имеет практически постоянное значение в широком диапазоне изменения параметров состояния и то, что объемное воздухо содержание паровоздушной смеси однозначно определяется ее массовым воздухо содержанием $r_g = f(\varepsilon_{60})$, окончательно имеем

$$N_{upn} = f(Re_c, Re_v, Pr_v, \varepsilon_{60}). \quad (13)$$

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:

$$N_{upn} = 4,29 \cdot 10^{-7} \cdot Re_c^{1,807} \cdot Re_v^{-0,720} \cdot Pr_v^{1,048} \cdot \varepsilon_{60}^{-4,310}, \quad (14)$$

подтвержденное в следующем диапазоне изменения переменных: $Re_c = (5,7 \div 12,9) \cdot 10^5$; $Re_v = (0,69 \div 2,46) \cdot 10^4$; $Pr_v = 6,21 \div 7,53$; $\varepsilon_{60} = 0,36 \div 0,545$. 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