

Раздел третий

ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

3.2. Системы золошлакоудаления ТЭС

3.2.2. Золоудаление

3.2.2.8. Оценка абразивного износа трубопроводов установок пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов

Путилова И.В., Путилов В.Я., МЭИ (ТУ)

АННОТАЦИЯ

Представлены основные сведения об абразивном износе трубопроводов установок пневмотранспорта и золы, угольной пыли, цемента, кокса, песка и других мелкодисперсных сыпучих абразивных материалов. Выявлены основные факторы и выполнена оценка их влияния на абразивный износ пневмотранспортных трубопроводов. Приведены зависимости для расчета прямолинейных (горизонтальных, наклонных и вертикальных) и криволинейных участков трубопроводов. Выполнена оценка погрешностей расчета абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок мелкодисперсных сыпучих абразивных материалов. Представленные зависимости являются результатом экспериментальных и аналитических исследований сотрудников Информационно-аналитического центра «Экология энергетики» и кафедры Котельных установок и экологии энергетики Московского энергетического института (технического университета).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Пневмотранспорт, мелкодисперсные сыпучие материалы, абразивный износ

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АБРАЗИВНОМ ИЗНОСЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Абразивный износ оборудования установок пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов является одной из главных проблем эксплуатации установок пневмотранспорта золы, угольной пыли, цемента, кокса, песка и других мелкодисперсных сыпучих абразивных полифракционных материалов. Из-за износа труб ухудшается экономическая эффективность пневматического транспорта твердых материалов, что проявляется в простоях, вызванных свищами в трубопроводах, в завышении толщины стенок и в ухудшении параметров транспортирования, связанного с увеличением внутреннего диаметра труб. Абразивный износ отрицательно влияет на надежность и экономичность работы не только пневмотранспортной установки, но и всего технологического комплекса, частью которого она является. Кроме того, даже незначительные нарушения плотности оборудования пневмотранспортных установок, приводят к постоянному пылению или залповым выбросам транспортируемого материала, что влечет за собой значительное ухудшение экологической обстановки в зоне влияния пневмотранспортной установки.

Абразивный износ трубопроводов является следствием взаимодействия частиц транспортируемого материала со стенкой трубы, в результате которого срезаются микроскопические стружки металла трубопровода. Это взаимодействие осуществляется между стенками трубопроводов и турбулизированным двухфазным потоком с высоким числом Re , и, следовательно, транспортируемые частицы атакуют стенки трубопровода под различными углами, которые невозможно установить практически, определить теоретически и описать математически. В этом случае рассматривается взаимодейст-

вие полифракционных потоков мелкодисперсных абразивных частиц со стенками трубопроводов, ось которых совпадает или не совпадает с осями пневмотранспортных трубопроводов.

Абразивному износу подвержено практически все оборудование пневмотранспортных установок, но повышенный абразивный износ по сравнению с другими элементами пневмотранспортной установки наблюдается в криволинейных участках трубопроводов, а именно в тех местах, где ось пылевоздушного потока направлена под углом к поверхности трубопроводов. К таким элементам относятся: запорно-регулирующая арматура, колена поворотов трубопроводов, тройники, переходы, переключатели потоков. Прямолинейные участки трубопроводов подвержены абразивному износу существенно меньше. Оценка абразивного износа криволинейных участков трубопроводов пневмотранспортных установок гораздо сложнее, чем прямолинейных трубопроводов. Это связано с тем, что до последнего времени в научно-технической литературе отсутствовали сведения об общепринятых обобщенных методиках для его расчета. Имелись лишь отдельные рекомендации, основанные на опыте эксплуатации или результатах экспериментальных исследований влияния отдельных значимых факторов на абразивный износ колен поворотов, тройников и других фасонных элементов трубопроводов пневмотранспортных установок. При этом следует подчеркнуть, что область применения этих рекомендаций ограничена условиями эксплуатации действующих пневмотранспортных установок или экспериментальных исследований, для которых они были разработаны. Поэтому в рамках научно-исследовательской работы, выполнявшейся в 2005-2006 годах сотрудниками кафедры Котельных установок и экологии энергетики Московского энергетического института (технического университета) в соответствии с грантом Президента РФ №МК-3945.2005.8, был исследован механизм абразивного износа криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов. В результате проведения исследований была разработана зависимость для расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов при пневмотранспорте золы, угольной пыли и других мелкодисперсных сыпучих абразивных материалов, позволяющая оценивать межремонтный срок эксплуатации трубопроводов пневмотранспортных установок.

Абразивный износ, в общем виде, зависит от физико-механических свойств транспортируемого материала, материала труб и условий транспортирования [1]. Наиболее важными факторами являются:

- скорость транспортирования;
- угол атаки (угол между направлением движения потока частиц и стенкой трубопровода);
- концентрация пылевоздушного потока;
- диаметр и форма частиц;
- степень полидисперсности транспортируемого материала;

- химический состав транспортируемого материала;
- прочностные характеристики материала трубопровода;
- внутренний диаметр трубопровода.

В табл.1 приведены основные факторы, оказывающие влияние на абразивный износ пневмотранспортных трубопроводов, и диапазоны изменения их количественных показателей.

Таблица 1. Основные факторы, влияющие на абразивный износ, и диапазоны изменения их количественных показателей

№	Наименование фактора	Обозначение фактора	Исследованный диапазон изменения фактора	Вид зависимости абразивного износа от фактора	Количественные показатели зависимости абразивного износа от фактора
1.	Скорость частиц транспортируемого материала	U_m	28...120 м/с	U_m^n	$n = 1,4...6$
2.	Массовая расходная концентрация	m	0,02...20 кг/кг	m^n	$n = -0,6...1,0$
3.	Коэффициент абразивности материала	f_a	Численные данные отсутствуют	f_a	$n=1,0$
4.	Диаметр частиц материала	d	23...1000 мкм	d^n	$n = 1,0...3,0$
5.	Внутренний диаметр трубопровода	D	13...500 мм	D^n	$n = -2,0$
6.	Угол атаки частиц	α	0...90°	$\alpha, \sin\alpha, \cos\alpha$	$\alpha_{max}=10...45^\circ, \alpha_0 < 15^\circ$
7.	Коэффициент формы частиц	k_f	Численные данные отсутствуют	k_f	$n=1,0$
8.	Коэффициент полидисперсности частиц	k_d	0,8...1,4	k_d	$n=-1,0$
9.	Твердость материала трубы по Виккерсу	HV	30...500	HV^n	$n = -0,4$
10.	Коэффициент относительной износостойкости материала трубопровода	$k_{изн}$	3,1	$k_{изн}$	$n = -1,0$
11.	Температура	T	Для пневмотранспорта угольной пыли и золы в условиях ТЭС на изменение абразивности не влияет, так как температура транспортируемого материала и оборудования меняется в незначительных пределах, а влияние величины температуры на абразивные свойства материала учитываются в коэффициенте абразивности		

2. ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

2.1. Прямолинейные участки

В соответствии с [2] зависимость для расчета удельного линейного абразивного износа горизонтальных и наклонных участков трубопроводов пневмотранспортных установок δ_h имеет вид:

$$\delta_{y.d.h} = 55,5 \cdot 10^{-6} \frac{U_M^2 \cdot K_{П} \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн}}, \text{ мм/т} \quad (1),$$

где U_m — средняя по сечению скорость потока частиц материала, м/с; $K_{П}$ — критерий Путилова по определению аэродинамической легкости частиц при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов, кг/м² [3]; k_{SiO_2} — коэффициент относительного содержания SiO_2 в транспортируемом материале; D — внутренний диаметр трубопровода, м; m — массовая расходная концентрация потока смеси материала и воздуха, кг материала/кг воздуха; $k_{изн}$ — коэффициент относительной износостойкости материала трубопровода.

Согласно [3] критерий аэродинамической легкости

частиц $K_{П}$ является одной из важнейших характеристик пневмотранспортируемых мелкодисперсных сыпучих материалов, численно равный отношению массы частицы к площади ее поверхности и определяется по выражению:

$$K_{П} = \frac{d_0 \rho_m}{6} \quad (2),$$

где ρ_m — плотность транспортируемого материала, кг/м³; d_0 — средневзвешенный эквивалентный диаметр частиц материала, м.

Коэффициент относительного содержания SiO_2 в транспортируемом материале k_{SiO_2} определяется по выражению:

$$k_{SiO_2} = \frac{\% \text{ содержания } SiO_2 \text{ в транспортируемом материале}}{\% \text{ содержания } SiO_2 \text{ в кварцевом песке}} \quad (3),$$

где массовое содержание SiO_2 в кварцевом песке составляет 94 % согласно ГОСТ 6139-91. «Песок стандартный для испытаний цементов (эталон)».

$k_{изн}$ определяется по зависимости (4):

$$k_{изн} = 6,42 \times 10^{-5} \times HV^2 - 0,0157 \times HV + 1,97 \quad (4),$$

где HV — твердость материала стенки трубопровода по Виккерсу.

На вертикально расположенных участках трубопро-

водов абразивный износ происходит равномерно по всей поверхности. Таким образом, зависимость (1) пригодна для расчета удельного абразивного износа горизонтальных и наклонных трубопроводов, а для вертикальных трубопроводов следует применять зависимость (5):

$$\delta_{y.d.h} = 13,9 \cdot 10^{-6} \frac{U_M^2 \cdot K_{II} \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн}}, \text{ мм/т} \quad (5),$$

которая по существу отличается только уменьшенным в 4 раза числовым коэффициентом.

2.2. Криволинейные участки

При разработке зависимости для расчета удельного линейного абразивного износа криволинейных участков трубопроводов при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов за основу была взята зависимость для расчета прямолинейных участков пневмотранспортных трубопроводов, которая была доработана с учетом оценки влияния угла атаки пылевоздушных потоков k_α и отношения радиуса поворота трубы к внутреннему ее диаметру $k_{R/D}$. В процессе разработки исследовалась сходимость результатов расчетов по получаемым зависимостям с фактическими данными по абразивному износу криволинейных участков трубопроводов при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов.

В конечном итоге была разработана зависимость для расчета удельного линейного абразивного износа криволинейных участков трубопроводов с учетом k_α и $k_{R/D}$, которая имеет следующий вид:

$$\delta_h = 5,55 \cdot 10^{-7} \frac{U_M^2 \cdot K_{II} \cdot k_{SiO_2} \cdot k_\alpha \cdot k_{R/D}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн}} \quad (6)$$

Коэффициент k_α определяется по следующим выра-

жениям:

$$k_\alpha = 0,0065\alpha^2 - 0,0385\alpha + 1,033 \quad \text{при } 0 < \alpha \leq 28,3^\circ \quad (7)$$

$$k_\alpha = 5e^{4,57} \cdot \alpha^{-1,39} \quad \text{при } 28,3 < \alpha < 90^\circ \quad (8)$$

Угол поворота пылевоздушных потоков более чем на 90° не рассматривался как не характерных для реальных пневмотранспортных установок золы и угольной пыли тепловых электростанций.

Коэффициент $k_{R/D}$ определяется по следующим выражениям:

$$k_{R/D} = -0,1113 \cdot R/D^2 + 0,6336 \cdot R/D + 0,1143 \quad \text{при } 0 < R/D \leq 3,3 \quad (9)$$

$$k_{R/D} = 1,448 \cdot R/D^{-0,3843} \quad \text{при } R/D > 3,3 \quad (10)$$

Межремонтный срок эксплуатации трубопроводов пневмотранспортных установок по условиям абразивного износа $T_{изн}$ определяется продолжительностью периода, в течение которого толщина стенки трубопровода $\delta_{ст}$ уменьшается до нормативной величины $\delta_{ост}$, устанавливаемой исходя из достаточной механической прочности трубопровода. В практической деятельности обычно принимают остаточную толщину трубопровода $\delta_{ост} = 4$ мм. Тогда, глубина эксплуатационного износа трубопровода $\delta_{изн}$ определяется по выражению:

$$\delta_{изн} = \delta_{ст} - \delta_{ост}, \text{ мм} \quad (11)$$

Срок эксплуатации трубопровода определяется из выражения (12):

$$T_{изн} = (\delta_{ст} - \delta_{ост}) / (3,6 \times \delta_h \times G_M), \text{ час} \quad (12)$$

В табл.2 приведены сведения о погрешностях определения параметров, влияющих на абразивный износ трубопроводов пневмотранспортных установок мелкодисперсных сыпучих абразивных полидисперсных материалов.

Таблица 2. Погрешности основных факторов, влияющих на абразивный износ пневмотранспортных трубопроводов

№ п/п	Название параметра	Погрешность определения (класс точности) δ , %	Измерительный прибор (метод измерения)
1.	Расход транспортируемого материала G_M , кг/с	1,5	Динамометр ДОСМ-3-5
2.	Объемный расход воздуха Q_B , м ³ /с	1,5	Дифманометр ДСП-786Н
3.	Диаметр трубопровода D , м	2,11 ¹	–
4.	Твердость металла трубы по Виккерсу HV , МПа	3,0	Твердомер
5.	Средневзвешенный диаметр частиц материала d_0 , мкм	5,0	Рассеивание на ситах, пневмокласификация
6.	Содержание кремния, SiO_2 , %	1,0	Химический анализ
7.	Абсолютное давление в трубопроводе P , МПа	0,5	Датчик давления МЭД 2306
8.	Температура воздуха t_a , °С	0,5	Лабораторный термометр
9.	Масса пробы M_n , кг	1,0	Аналитические весы
10.	Объем пробы V_n , м ³	1,0	Мерный сосуд
11.	Угол атаки α , град.	0,56	Угломер
12.	Радиус поворота трубы R	0,05	Математический расчет

¹ В соответствии с [4] оценка погрешности диаметра трубопровода производится с учетом овальности и разностенности трубы. Относительная погрешность, связанная с овальностью трубы, составляет 1,25 % при $D > 219$ мм, разностенностью – 0,86 % при $D \geq 219$ мм и толщиной стенки трубы 15 мм.

Пусть $\delta_h = f(U_m^2, K_{II}, k_{SiO_2}, m^{-0.4}, D^2, k_{изн}^{-1})$.

Скорость несущего воздуха определяется по формуле:

$$U = \frac{Q_6}{\pi D^2 / 4} \quad (13)$$

Относительная погрешность определения U_6 составляет:

$$\delta U = \delta U_m = \sqrt{\delta Q_6^2 + (2\delta D)^2} = 4,479 \% \quad (14)$$

Погрешность определения ρ_m :

$$\delta \rho_m = \sqrt{\delta M_n^2 + \delta V_n^2} = 1,414 \% \quad (15)$$

Погрешность определения K_{II} :

$$\delta K_{II} = \sqrt{\delta \rho_m^2 + \delta d_0^2} = 5,196 \% \quad (16)$$

Погрешность определения ρ_6 :

$$\delta \rho_6 = \sqrt{\delta P^2 + \delta t_6^2} = 0,707 \% \quad (17)$$

$$\delta(\delta_h) = \sqrt{(2 \cdot \delta U_m)^2 + \delta K_{II}^2 + \delta k_{SiO_2}^2 + (0,4 \cdot \delta m)^2 + (2 \cdot \delta D)^2 + \delta k_{изн}^2} \quad (21)$$

$$\delta(\delta_h) = \sqrt{(2 \cdot 4,479)^2 + 5,196^2 + 1,0^2 + (0,4 \cdot 2,236)^2 + (2 \cdot 2,11)^2 + 6,708^2} = 13,1 \% \quad (22)$$

Относительная погрешность зависимости для расчета абразивного износа криволинейных участков трубопроводов δ_h рассчитывается следующим образом:

$$\delta(\delta_h) = \sqrt{(2 \cdot \delta U_m)^2 + \delta K_{II}^2 + \delta k_{SiO_2}^2 + (0,4 \cdot \delta m)^2 + (2 \cdot \delta D)^2 + \delta k_{изн}^2 + \delta k_{\alpha}^2 + \delta k_R^2} \quad (23)$$

$$\delta(\delta_h) = \sqrt{(2 \cdot 4,479)^2 + 5,196^2 + 1,0^2 + (0,4 \cdot 2,236)^2 + (2 \cdot 2,11)^2 + 6,708^2 + 0,56^2 + 0,05^2} = 13,12 \% \quad (24)$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прохоров В.Б., Путилов В.Я., Путилова И.В. и др. Научное обоснование концепции и методов оптимизации структуры и параметров перспективных энергоблоков ТЭС: заключительный отчет, №Г.Р.01200001463.- М.:МЭИ.-2002. – 157 с. Отчет по НИР МЭИ, (заключительный).
2. Путилов В.Я., Путилова И.В. Расчет абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок золы и угольной пыли ТЭС // Теплоэнергетика, №9, 2003, с.60-67.
3. Путилов В.Я. Аэродинамика систем напорного пневмотранспорта золы тепловых электростанций. Автореферат диссертации на соискание учебной степени канд. техн. наук.-М.: МЭИ, 1992, 20 с.
4. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячешформированные. Гос. комитет СССР по стандартам, М., 1985.

Погрешность определения G_6 :

$$\delta G_6 = \sqrt{\delta \rho_6^2 + \delta Q_6^2} = 1,658 \% \quad (18)$$

Погрешность определения m :

$$\delta m = \sqrt{\delta G_m^2 + \delta G_6^2} = 2,236 \% \quad (19)$$

Погрешность определения $k_{изн}$:

$$\delta k_{изн} = \sqrt{(2\delta HV)^2 + \delta HV^2} = 6,708 \% \quad (20)$$

Используя относительные погрешности, рассчитанные по вышеприведенным формулам, получаем окончательную относительную погрешность зависимости для расчета абразивного износа прямолинейных участков трубопроводов δ_h :