

Раздел третий

ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

3.2. Системы золошлакоудаления ТЭС

3.2.2. Золоудаление

3.2.2.6. Оценка межремонтного срока эксплуатации трубопроводов установок пневмотранспорта золы и угольной пыли ТЭС и рекомендации по его повышению

Путилова И.В., Путилов В.Я., МЭИ(ТУ)

АННОТАЦИЯ

Представлены зависимости для расчета межремонтного срока эксплуатации трубопроводов установок пневмотранспорта золы, угольной пыли и других мелкодисперсных сыпучих абразивных материалов для прямолинейных горизонтальных, наклонных и вертикальных, а также криволинейных участков трубопроводов. Зависимости разработаны сотрудниками кафедры Котельных установок и экологии энергетики Московского энергетического института (технического университета). Приведены режимные, технологические и комплексные мероприятия по повышению срока эксплуатации пневмотранспортных трубопроводов.

ВВЕДЕНИЕ

Межремонтный срок и надежность эксплуатации пневмотранспортных трубопроводов существенно зависят от абразивного износа, который является одной из главных проблем установок пневмотранспорта золы, угля, цемента, кокса, песка и других мелкодисперсных сыпучих абразивных 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 трубопроводов является следствием взаимодействия частиц транспортируемого материала со стенкой трубы, в результате которого срезаются микроскопические стружки металла трубопровода. Это взаимодействие осуществляется турбулизированным двухфазным потоком с высоким числом Re , и, следовательно, транспортируемые частицы атакуют стенку трубопровода под углами, которые невозможно определить теоретически и описать математически.

Повышенный абразивный износ по сравнению с другими элементами пневмотранспортной установки наблюдается в криволинейных участках трубопроводов, а именно в тех местах, где ось пылевого 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 отсутствовали общепринятые обобщенные методики 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 подчерк-

нуть, 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, 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 определять межремонтный срок эксплуатации трубопроводов пневмотранспортных установок.

ПРЯМОЛИНЕЙНЫЕ УЧАСТКИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В соответствии с [1] зависимость для расчета удельного линейного абразивного износа горизонтальных и наклонных участков трубопроводов пневмотранспортных установок δ_h имеет вид:

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

где U_M — средняя по сечению скорость потока частиц материала, м/с; K_{II} — критерий Путилова по определению аэродинамической легкости частиц при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов, кг/м² [2]; 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 [2] критерий аэродинамической легкости частиц K_{II} является одной из важнейших характеристик пневмотранспортируемых мелкодисперсных сыпучих материалов, численно равный отношению массы частицы к площади ее поверхности и определяется по выражению:

$$K_{II} = \frac{d_0 \rho_M}{6}$$

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:

$$k_{SiO_2} = \frac{\% \text{ содержания } SiO_2 \text{ в транспортируемом материале}}{\% \text{ содержания } SiO_2 \text{ в кварцевом песке}}$$

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 (3):

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

где HV – твердость материала стенки трубопровода по Виккерсу.

На вертикально расположенных участках трубопроводов 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 (3):

$$\delta_{y\partial.h} = 13,9 \cdot 10^{-6} \frac{U_M^2 \cdot K_{II} \cdot k_{\text{SiO}_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн}}, \text{ мм/т}, \quad (3),$$

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

КРИВОЛИНЕЙНЫЕ УЧАСТКИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

При разработке зависимости для расчета криволинейных участков трубопроводов пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов за основу была взята зависимость для расчета прямолинейных участков пневмотранспортных трубопроводов, которая была доработана. При этом была сделана оценка влияния угла атаки и отношения радиуса поворота трубы к внутреннему ее диаметру.

Зависимость для расчета удельного линейного абразивного износа криволинейных участков трубопроводов имеет следующий вид:

$$\delta_h = 5,55 \cdot 10^{-7} \frac{U_M^2 \cdot K_{II} \cdot k_{\text{SiO}_2} \cdot k_\alpha \cdot k_{R/D}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн}} \quad (4)$$

Влияние угла атаки α на абразивный износ криволинейных участков пневмотранспортных трубопроводов учитывается введением коэффициента k_α :

$$k_\alpha = 0,0065\alpha^2 - 0,0385\alpha + 1,033 \text{ при } 0 < \alpha \leq 28,3^\circ \quad (5)$$

$$k_\alpha = 5e^{4,57} \cdot \alpha^{-1,39} \text{ при } \alpha > 28,3^\circ \quad (6)$$

Коэффициент отношения радиуса поворота трубы к внутреннему ее диаметру определяется по формулам:

$$k_{R/D} = -0,1113 \cdot R/D^2 + 0,6336 \cdot R/D + 0,1143 \text{ при } 0 < R/D \leq 3,3 \quad (7)$$

$$k_{R/D} = 1,448 \cdot R/D^{-0,3843} \text{ при } R/D > 3,3 \quad (8)$$

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:

$$\delta_{изн} = \delta_{ст} - \delta_{ост}, \text{ мм} \quad (9)$$

Срок эксплуатации трубопровода определяется из выражения (10):

$$T_{изн} = (\delta_{ст} - \delta_{ост}) / (3,6 \times \delta_h \times G_M), \text{ час} \quad (10)$$

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Мероприятия по снижению абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок можно разделить на 2 группы: режимные и конструктивные.

К основным режимным мероприятиям относятся следующие:

1. проворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков трубопроводов вокруг их оси на угол $70 \dots 80^\circ$;
 2. транспортирование пылевоздушного потока с оптимальными параметрами в соответствии с [4, 5];
- Ко второй группе мероприятий относятся:
1. оптимизация формы фасонных участков трубопроводов [6];
 2. выполнение участков аэродинамической стабилизации пылевоздушных потоков на входе в фасонные участки трубопроводов и выходе из них с учетом зоны максимального износа;
 3. применение антиабразивных вставок в колена поворотов трубопроводов;
 4. применение камнелитых изделий при выполнении поворотов трубопроводов;
 5. использование труб с алюмотермическим покрытием или с пониженным абразивным износом;
 6. нанесение антиабразивных покрытий на внутренние поверхности изготовленных фасонных участков трубопроводов.

Проворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков пылепроводов вокруг их оси.

Обычно прямолинейные горизонтальные и наклонные участки пылепроводов, подверженные интенсивному абразивному износу, проворачивают вокруг оси 3 раза, что позволяет продлить срок их эксплуатации в 4 раза по сравнению с расчетным. На вертикально расположенных участках пылепроводов абразивный износ происходит равномерно по всей поверхности. Таким образом, осуществляя проворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков пылепроводов вокруг их оси в процессе эксплуатации, можно увеличить объем транспортируемого материала не менее, чем в 4 раза до возникновения необходимости их замены. При этом, что очень важно, срок эксплуатации прямолинейных горизонтальных и вертикальных участков трубопроводов оказывается примерно равным.

Транспортирование пылевоздушных потоков с оптимальными параметрами. Если при выполнении пылепровода не были учтены оптимальные скорости и массовые концентрации пылевоздушных потоков, то абразивный износ отдельных его участков может быть существенно большим по сравнению с другими участками. Для исправления создавшегося положения необходимо рассчитать оптимальные параметры всего трубопровода в соответствии с [4 и 5] и установить трубы расчетного диаметра на наиболее изнашиваемых его участках.

Оптимизация формы фасонных участков пылепроводов. Так как наиболее изнашиваемыми участками пылепроводов являются колена поворотов, тройники, переключатели и другая арматура, то при проектировании пылепроводов их число должно быть принято минимально возможным, а фасонные участки должны иметь оптимальные характеристики в отношении абразивного износа и аэродинамического сопротивления. Например, известно, что форма диффузорного перехода

с меньшего диаметра ступенчатого пылепровода на больший существенно влияет на потери давления и абразивный износ как в самом диффузоре, так и на прилегающих к нему участках пылепроводов. В соответствии с [5] рекомендуемая форма перехода представлена на рис. 1.

Длина диффузорного перехода:

$$L_{\text{диф}} \geq \frac{D_2 - D_1}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{D_2 - D_1}{0,263}.$$

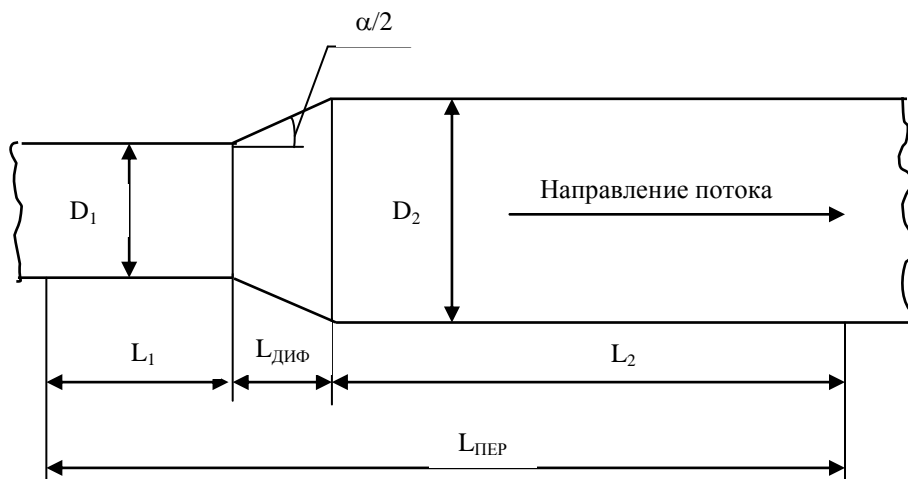


Рис.1. Форма диффузорного перехода с меньшего диаметра труб на больший при ступенчатом выполнении пылепроводов: $L_{\text{ПЕР}}$ — общая длина перехода с учетом длин участков аэродинамической стабилизации пылевоздушного потока; $L_{\text{диф}}$ — длина диффузорного перехода; D_1 и D_2 — внутренние диаметры труб до и после диффузорного перехода; L_1 и L_2 — участки аэродинамической стабилизации пылевоздушного потока до и после диффузорного перехода; α — угол диффузорного перехода.

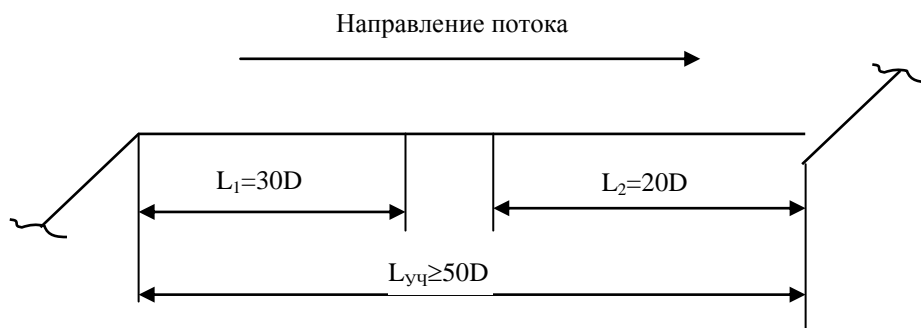


Рис.2. Схема участка пневмозолопровода: $L_{\text{уч}}$ — длина прямолинейного горизонтального (вертикального) участка при сложной трассе пневмозолопроводов; L_1 — длина участка аэродинамической стабилизации золовоздушного потока после прохождения местного сопротивления; L_2 — то же, но перед местным сопротивлением.

Выполнение участков аэродинамической стабилизации потоков на входе в фасонные участки пылепроводов и выходе из них с учетом зоны максимального износа. Повышенному абразивному износу при всех прочих равных условиях подвержены участки пылепроводов на входе и выходе из колен поворотов трубопроводов, диффузоров, запорно-регулирующей и переключающей арматуры (рис. 1 и 2).

Согласно [5] суммарная длина участка аэродинамической стабилизации пылевоздушного потока для случая, представленного на рис. 2, должна удовлетворять условию:

$$L_{\text{стаб}} \geq 50D.$$

Однако интенсивному абразивному износу в соответствии с [4] подвержены участки аэродинамической стабилизации не по всей длине, а только в частях, непосредственно прилегающих к возмущающим элементам пыле-

проводов. Поэтому, чтобы избежать частого ремонта или замены наиболее изнашиваемых участков пылепроводов, необходимо непосредственно на входе в фасонные участки и на выходе из них устанавливать патрубки с антиабразивным покрытием или с повышенной износостойкостью длиной не менее $5D$ каждый.

Применение антиабразивных вставок в колена поворотов пылепроводов. Антиабразивные вставки снижают скорость износа. Снижение скорости износа зависит от материала вставок и на практике составляет не менее 20 % по сравнению с данными для таких же колен поворотов пылепроводов без вставок.

Применение камнелитых изделий. Использование вставок из базальтового литя в фасонных участках и патрубках на участках аэродинамической стабилизации пылевоздушных потоков пылепроводов позволяет повысить их износо- и кислотостойкость.

При анализе результатов эксплуатации пневмотранспортных установок было установлено, что межремонтный срок эксплуатации оборудования, защищенного камненным литьем, увеличивается в 4...6 раз. Использование камненного литья на металлургических предприятиях в количестве 30...36 тыс. т позволяет сэкономить не менее 100 тыс. т металла в год. На каждой установленной тонне камнелитых изделий экономится 2...5 т металла и значительно сокращается объем ремонтных работ на пылепроводах. Однако применение труб с камнелитыми изделиями в условиях резкоконтинентального климата на большей части России имеет следующие основные недостатки:

- 1) растрескивание камнелитых вкладышей вследствие изменений геометрических размеров фасонных участков из-за высоких температурных перепадов в процессе эксплуатации и выбивание отдельных фрагментов вкладышей в пылепровод, что зачастую приводит к завалу трубопровода;
- 2) необходимость установки «мертвых опор» для жесткой фиксации фасонных участков пылепроводов во избежание негативных последствий, указанных в п.1;
- 3) необходимость установки температурных компенсаторов на прямолинейных участках пылепроводов для компенсации изменения линейных размеров трубопроводов из-за температурных перепадов;
- 4) очень жесткие требования к транспортировке и хранению камнелитых изделий, а также к качеству монтажных работ при строительстве и ремонте пнев-

мотранспортных установок;

- 5) недостаточных типоряд внутренних диаметров колен ($D_y=150, 175, 200, 225$ и 250 мм), что существенно ограничивает возможность их применения.

Использование труб с алюмотермическим покрытием. Трубы с алюмотермическим покрытием применяются в системах гидрозолоудаления на Павлодарских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 (около 30 лет), пылеподачи Рефтинской ГРЭС (более 22 лет) и пневмозолоудаления Аксусской электростанции (более 16 лет). В настоящее время отсутствуют данные о замене или ремонте ранее установленных участков пылепроводов с алюмотермическим покрытием, так как их эксплуатация продолжается без замечаний. Пылепроводы с алюмотермическим покрытием имеют существенно большую абразивную стойкость по сравнению со стойкостью пылепроводов, выполненных из других материалов. Следует подчеркнуть, что это относится не только к прямолинейным, но и к фасонным участкам пылепроводов. Оценочный срок службы пылепроводов с алюмотермическим покрытием, по мнению представителей предприятия-изготовителя, приблизительно в 10 раз больше по сравнению со сроком службы пылепроводов, выполненных из стали марки Ст.5. На основании наших исследований [4] численные значения коэффициента относительной износостойкости пылепроводов из труб с алюмотермическим покрытием находится в диапазоне 300...400. Относительная износостойкость пылепроводов из различных материалов приведена в таблице.

Таблица. Относительная износостойкость пылепроводов из различных материалов

Материал трубопровода	Твердость по Виккерсу, HV	Коэффициент относительной износостойкости трубопроводов из различных материалов, $k_{изн}$
Медь	125	1,00
Сталь 5	130	1,01
Сталь 25Л	130	1,01
Сталь 3	135	1,02
Сталь 10	137	1,02
Сталь 4сп	140	1,03
Сталь 5сп	150	1,06
Сталь 20	156	1,08
Сталь 35Л	160	1,10
Сталь 35	187	1,28
Сталь 25Г2	200	1,40
Сталь 37 (St37)	210	1,50
Сталь 40, 40X (с отжигом)	217	1,59
Серый чугун	223	1,66
Сталь 30ХГС, сталь 30ХГСА (с отжигом)	229	1,74
Сталь 55Л (с термообработкой)	240	1,90
Сталь 45	241	1,92
Сталь 30Х13	270	2,41
Сталь 40Х13	300	3,04
Сталь 55Л	340	4,05
Сталь X5CrNi189	380	5,27
Трубы с алюмотермическим покрытием	2500	364,00

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Путилов В.Я., Путилова И.В. Расчет абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок золы и угольной пыли ТЭС // Теплоэнергетика, №9, 2003, с.60-67.
2. Путилов В.Я. Аэродинамика систем напорного пневмотранспорта золы тепловых электростанций. Авторефе-

рат диссертации на соискание учебной степени канд. техн. наук.-М.: МЭИ, 1992, 20 с.

3. Исследование фундаментальных основ и разработка математической модели расчета абразивного износа оборудования систем золошлакоудаления и пылеподачи ТЭС при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов/ Путилов В.Я., Прохоров В.Б., Путилова И.В. и др. Заключительный отчет, №Г.Р.01200102648.-М.:МЭИ.-

2002. – 54 с.

4. **РД 153-34.1-27.512-2001.** Методические указания по расчету и рекомендации по снижению абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов систем пылеприготовления и золошлакоудаления ТЭС / В.Я. Путилов, И.В. Путилова, Б.Л. Вишня и др. М.: МЭИ (ТУ), 2001.
5. **РД 34.27.109-96.** Методические указания по проектированию систем пневмозолоудаления золы от котлоагрегатов, установок отпуска сухой золы потребителям и отгрузки ее на насыпные золоотвалы / Б.Л. Вишня, В.Я. Путилов. Екатеринбург, УРАЛТЕХЭНЕРГО, 1996.
6. **Путилов В.Я., Путилова И.В.** Оптимизация параметров колен поворотов трубопроводов пневмотранспортных установок систем золошлакоудаления и пылеприготовления ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка, № 2, 2004, с.67-70.

Путилова И.В., Путилов В.Я. Оценка межремонтного срока эксплуатации трубопроводов установок пневмотранспорта золы и угольной пыли ТЭС и рекомендации по его повышению // Материалы Международной конференции «Мир угольной золы», 7 – 10 мая 2007 г., Ковингтон, Кентукки, США.