



РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СНИЖЕНИЮ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМ ЗОЛОШЛАКОУДАЛЕНИЯ ТЭС

Путилова И.В.

ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», НИО «Научно-образовательный центр «Экология энергетики»
д. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия
тел./факс: +7(495)362-79-12; e-mail: putilovaiv@ecopower.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.11.009

Заключение совета рецензентов: 28.10.20

Заключение совета экспертов: 28.10.20

Принято к публикации: 30.10.20



На угольных тепловых электростанциях (ТЭС) России в подавляющем большинстве случаев для транспортирования золы и шлака применяются системы гидравлического золошлакоудаления. Такие технические решения, связанные с эвакуацией шлака из-под котлов и транспортированием летучей золы после электрофильтров, тиражировались еще с советских времен. Системы гидрозолоудаления (ГЗУ) наносили и продолжают наносить значительный ущерб окружающей природной среде в зоне расположения угольных ТЭС, средний возраст которых на сегодняшний день составляет примерно 45-50 лет. Межремонтный срок и надежность эксплуатации трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС существенно зависит от абразивного износа, являющегося одной из главных проблем при транспортировании мелкодисперсных сыпучих материалов, которыми являются зола и шлак. Износ трубопроводов приводит к снижению надежности работы всей системы ГЗУ; возникает необходимость вынужденных простоев, вызванных свищами в трубопроводах, в результате чего происходит выпуск золошлаковой пульпы в окружающую среду. Кроме того, утонение толщины стенок пульпопроводов приводит к необходимости увеличения диаметра труб, что, в свою очередь, приводит к ухудшению экономической эффективности транспортирования золошлаковой пульпы.

В статье рассматривается проблема абразивного износа гидротранспортных трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС. На основании результатов исследований описаны основные мероприятия для продления срока эксплуатации прямолинейных и фасонных участков пульпопроводов систем ГЗУ ТЭС. С целью снижения интенсивности абразивного износа возможно применение режимных мероприятий, не требующих инвестиций в реконструкцию действующих гидротранспортных установок. К таким мероприятиям относятся: проворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков пульпопроводов вокруг своей оси; транспортирование пульпы с оптимальными параметрами. Кроме упомянутых рассмотрены конструктивные мероприятия, в разной мере требующие инвестиции в реконструкцию гидротранспортных установок, как, например: оптимизация формы фасонных участков пульпопроводов; выполнение участков гидродинамической стабилизации потоков на входе и выходе из фасонных участков пульпопроводов с учетом зоны максимального износа; применение антиабразивных вставок в колена поворотов пульпопроводов; применение камнелитых изделий; использование труб с алюмотермическим покрытием. Максимальная эффективность внедрения противоабразивных рекомендаций достигается при сочетании режимных и конструктивных мероприятий.

Ключевые слова: ТЭС, абразивный износ, трубопроводы, пульпопроводы, зола, шлак, золоудаление.

RECOMMENDATIONS FOR REDUCING ABRASIVE WEAR OF HYDROTRANSPORT PIPELINES OF TPP ASH AND SLAG REMOVAL SYSTEMS



I.V. Putilova

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”
 Centre for Science and Education “Ecology of Power Engineering”, 14 Krasnokazarmennaya St., Moscow,
 111250, Russia tel./fax: +7(495)362 79 12; e-mail: putilovaiv@ecopower.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.11.009

Referred: 28.10.20

Received in revised form: 28.10.20

Accepted: 30.10.20

In the vast majority of cases, hydraulic ash and slag removal systems are used for conveying ash and slag at the coal-fired thermal power plants (TPPs) in Russia. Such technical solutions related to the evacuation of slag from boilers and transportation of fly ash after electrostatic precipitators have been replicated since the Soviet times. Hydraulic ash and slag removal systems cause significant damage to the natural environment in the area of coal-fired TPPs location. It should be noted, that the average age of TPPs is about 45-50 years. The inter-repair period and reliable operation of pipelines of TPP ash and slag removal systems significantly depend on abrasive wear, which is one of the main problems when transporting fine bulk materials like ash and slag. Abrasive wear or erosion in pipelines leads to a decrease in the reliability of the entire wet ash removal system; there is a need for the unplanned downtime caused by fistulas in pipelines, resulting in the release of ash and slag slurry into the environment. In addition, the thinning of the pipeline wall thickness leads to the increase in the diameter of pipes, which, in turn, leads to deterioration in the economic efficiency of transporting the ash and slag slurry.

The article deals with the problem of abrasive wear of slurry pipelines of TPP ash and slag removal systems. Based on the research results, the main measures for extending the service life of straight and shaped sections of pipelines of TPP wet ash and slag removal systems are described. In order to reduce the intensity of abrasive wear, it is possible to apply regime measures that do not require investment in the reconstruction of existing hydrotransport installations. These measures include: turning the straight horizontal and inclined sections of pipelines around their axis; transporting the slurry with optimal parameters. In addition to the mentioned group of measures, constructive measures are considered that require investment in the reconstruction of hydrotransport installations to varying degrees, such as: optimizing the shape of curvilinear sections of pipelines; performing sections of hydrodynamic flow stabilization at the entrance and exit of the curvilinear (shaped) sections of pipelines, taking into account the zone of maximum wear; anti-abrasive inserts in the shaped sections of pipelines; stone-cast products; pipes with an aluminum-thermal coating. The maximum effectiveness of implementing anti-abrasive recommendations is achieved by combining regime and constructive measures.

Keywords: thermal power plant, abrasive wear, slurry pipelines, ash, slag, ash and slag removal.



*Ирина Вячеславовна
Путилова
Irina Putilova*

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент, заведующая научно-образовательным Центром «Экология энергетики» (НОЦ «Экология энергетики» МЭИ), член редакционной коллегии от России электронного журнала “Coal Combustion and Gasification Products” (www.coalceg-journal.org).

Награды и премии: победитель конкурса «Мой первый грант» Российского фонда фундаментальных исследований, 2012г.

Образование: Московский энергетический институт (2001 г.).

Область научных интересов: природоохранное законодательство и технологии в энергетике, проблема обращения с золошлаками энергетики; информационное обеспечение природоохранной деятельности энергопредприятий ТЭК, ЖКХ и других отраслей экономики; повышение квалификации и профессиональная переподготовка специалистов энергопредприятий по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Электроэнергетика и электротехника».

Публикации: более 100.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Head of the Centre for Science and Education “Ecology of Power Engineering” of MPEI, Member of the Editorial board from Russia of the Electronic Journal “Coal Combustion and Gasification Products” (www.coalceg-journal.org).

Awards: winner of the tender “My First Grant”, Russian Foundation for Basic Research, 2012.

Education: Moscow Power Engineering Institute, 2001.

Research area: environmental protection legislation and technologies in power engineering, coal ash handling; information support of nature protection activity of power utilities of the fuel and energy complex, housing and communal services and other branches of economy; professional development and retraining of specialists of power utilities on Thermal Power Engineering and Electric Power Engineering..

Publications: more than 100.



Введение

В настоящее время в Российской Федерации доля угля в топливном балансе энергетических предприятий составляет около 30 %. Большинство угольных ТЭС России находятся на территории Урала, Сибири и Дальнего Востока. На ТЭС России, сжигающих уголь, торф и сланцы, ежегодно образуется около 27 млн. т золошлаков [1, 2], утилизация которых является одной из основных проблем современных ТЭС. На ТЭС применяются различные системы транспортирования золошлаков: гидротранспортные, пневмотранспортные, механические, комбинированные. Наименее перспективными по технико-экономическим и экологическим показателям являются системы гидрозолоудаления. В целом по отрасли около 85% золошлаков транспортируется в виде пульпы низкой концентрации по трубопроводам суммарной длиной более 4 тыс. км для размещения их на гидрозолоотвалах. Последние являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды при производстве электрической и тепловой энергии и наносят значительный ущерб окружающей среде в зоне их расположения [3]. Пневмотранспортные системы, применяемые для перемещения золошлаков ТЭС, являются гораздо более экологичными, экономичными и перспективными, однако, они крайне редко используются на ТЭС.

Существенным недостатком систем гидротранспорта и пневмотранспорта золошлаков является повышенный абразивный износ прямолинейных и криволинейных участков трубопроводов (золошлакопроводов), от которого, в значительной степени, зависит их межремонтный срок и надёжность эксплуатации систем. Из-за износа труб снижается надёжность, возникает необходимость вынужденных простоев, вызванных свищами в трубопроводах, в результате чего происходит выброс или сброс транспортируемого материала в окружающую среду, что приводит к существенному ухудшению экологической обстановки в зоне выброса или сброса; также ухудшается экономическая эффективность транспорта материалов, связанная с увеличением диаметра труб вследствие утонения толщины стенок трубопроводов [4]. На большинстве угольных ТЭС системы ГЗУ эксплуатируются не менее 45-50 лет и наносят значительный ущерб окружающей природной среде. Изношенное оборудование, включая золошлакопроводы, требует постоянной замены и применения специальных защитных противоабразивных мероприятий, в связи с чем рассматриваемая

тематика является актуальной и важной, особенно при транспорте золошлаков с повышенной абразивностью.

Абразивный износ трубопроводов является следствием взаимодействия частиц транспортируемого материала со стенкой трубы, в результате которого срезаются микроскопические стружки металла трубопровода. В общем виде, абразивный износ трубопроводов систем гидрозолошлакоудаления ТЭС зависит от свойств золы, материала труб и условий транспортирования. На абразивные свойства транспортируемой золы влияют: форма частиц, плотность и крупность материала, полидисперсность (фракционный состав) потока, а также химико-минералогический состав.

Для снижения абразивного износа и продления срока эксплуатации трубопроводов систем гидрозолоудаления ТЭС применяются следующие основные мероприятия, справедливые для гидро- и пневмотранспорта по данным авторов [5]:

1. поворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков пульпопроводов вокруг своей оси;
2. транспортирование пульпы с оптимальными параметрами;
3. оптимизация формы фасонных участков пульпопроводов;
4. выполнение участков гидродинамической стабилизации пульпы на входе и выходе из фасонных участков пульпопроводов с учетом зоны максимального износа;
5. применение антиабразивных вставок в колена поворотов пульпопроводов;
6. применение камнелитых изделий на фасонных участках пульпопроводов;
7. использование труб с алюмотермическим покрытием и др.

Целью статьи является анализ применяющихся и перспективных противоабразивных мероприятий, направленных на существенное продление срока службы трубопроводов систем ГЗУ ТЭС. Ценность излагаемого материала состоит в том, что в одной статье содержится информация о достоинствах и недостатках различных противоабразивных мероприятий, применяющихся в энергетике для защиты трубопроводов от абразивного износа. Кроме того, приводится информация о применении наиболее перспективной технологии - использование труб с алюмотермическим (керамическим) покрытием и фасонных участков трубопроводов с описанием сравнительных характеристик труб с нанесенным покрытием.

Список обозначений	
Буквы латинского алфавита	
<i>L</i>	Длина участка
<i>D</i>	Внешний диаметр
<i>d</i>	Внутренний диаметр
<i>R</i>	Радиус поворота

<i>C^o</i>	Градус Цельсия (гр. С)
<i>Fe</i>	Железо
<i>O</i>	Кислород
<i>Al</i>	Алюминий
<i>H</i>	Водород

Cl	Хлор
S	Сера
Буквы греческого алфавита	
<i>a</i>	Угол
<i>tg</i>	Тангенс
Аббревиатуры	
ТЭС	Тепловая электрическая станция

ГЗУ	Гидрозолоудаление
ИСМАН	Институт структурной макрокинетики Академии наук СССР
СВС	самораспространяющийся высокотемпературный синтез
КНР	Китайская народная республика
ТЭЦ	Теплоэлектроцентраль
ГРЭС	Государственная районная электростанция

1. Анализ основных антиабразивных мероприятий для продления ресурса пульпопроводов систем ГЗУ ТЭС

Проворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков пульпопроводов вокруг своей оси.

При обработке результатов исследований авторами [6] было установлено, что наиболее интенсивно процесс износа происходит в зоне внешней образующей колена поворота трубопровода при угле атаки потока к поверхности колена $a = 10 \dots 45^\circ$. При этом

максимальный износ наблюдается в зоне внешней образующей колена поворота трубопровода при $a = 25 \dots 28^\circ$, а градусная мера дуги области интенсивного абразивного износа в поперечном сечении колена составляет примерно $70 \dots 80^\circ$ (рис.1).

В области внутренней образующей колена абразивный износ существенно меньше. Примерно такая же картина абразивного износа наблюдается и на наклонных участках транспортных трубопроводов. Эта особенность абразивного износа горизонтальных и наклонных участков трубопроводов учитывается в практической деятельности при разработке мероприятий для продления срока их эксплуатации – проворот прямолинейных участков пульпопроводов вокруг своей оси.

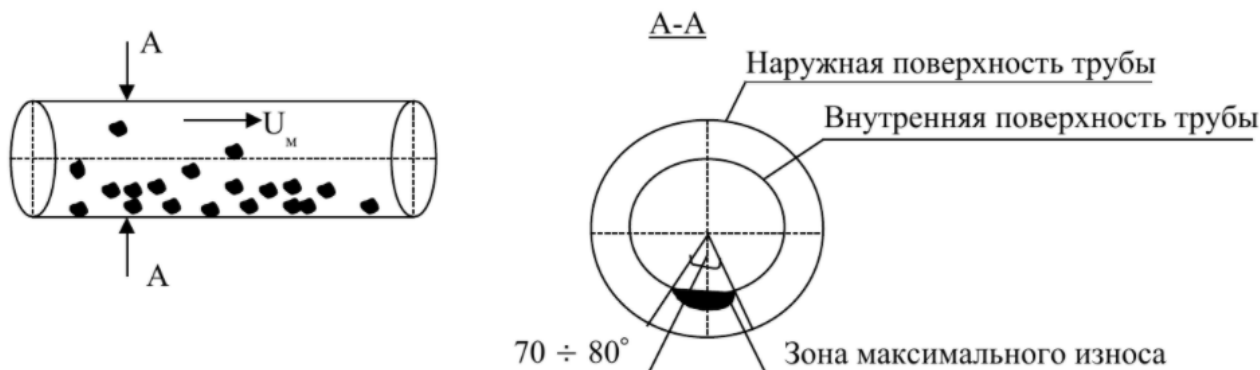


Рис.1 Зона максимального износа трубопроводов
Fig.1. Zone of maximum pipe wear

Согласно [6] и [7] прямолинейные горизонтальные и наклонные участки пульпопроводов от багерной насосной до гидрозолашлакоотвала, подверженные интенсивному абразивному износу, проворачивают вокруг своей оси на $90 \dots 120^\circ$, что позволяет продлить срок их эксплуатации в $3 \dots 4$ раза по сравнению с исходным. На вертикально расположенных участках пульпопроводов абразивный износ происходит равномерно по всей поверхности. Таким образом, осуществляя проворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков пульпопроводов вокруг своей оси в процессе их эксплуатации, можно увеличить объем транспортируемого материала не менее чем в 3 раза до возникновения необходимости их замены.

Выбор оптимальных режимов транспортирования пульпы с целью достижения максимального продления межремонтного срока эксплуатации пульпопроводов

В случае выполнения пульпопроводов без учета оптимальных скоростей и концентрации твердых частиц в пульпе величина абразивного износа отдельных его участков может существенно возрастать. Так, например, согласно [8] абразивный износ пульпопроводов прямо пропорционален скорости транспортирования золовой пульпы в степени 2,5, а концентрации частиц золы в пульпе – в степени 0,65. Таким образом, для обеспечения максимальной долговечности пульпопроводов необходимо выбирать минимально допустимые скорости транспортирова-



ния пульпы и оптимальные её концентрации на наиболее изношенных участках. Если скорость движения пульпы будет меньше критической, то более крупные частицы золы станут осажаться на дно, и пульпопровод будет заливаться. Образование "пробок" наиболее вероятно в компенсаторах, на поворотах, в люках и фланцевых соединениях. Следовательно, для нормальной работы напорного гидротранспортного трубопровода мелкодисперсных материалов необходимо, чтобы скорость движения

пульпы была равна или несколько превышала критическую [9]. По мнению ряда авторов, минимально допустимая скорость движения пульпы, обеспечивающая надежный гидротранспорт, зависит от массовой концентрации золы (шлака) в пульпе, составляющей обычно от 5 до 20 %, для золы пульпы рекомендуется скорость 1,2...1,4 м/с, для шлаковой – 1,7...2,3 м/с.

Согласно [7] оптимальные скорости пульпы представлены в табл.1

Таблица 1

Значения оптимальных скоростей пульпы, м/с

Table 1

Optimal velocities of the slurry, m/s

Условный диаметр пульпопровода, м	Жидкий шлак с золой и без золы	Твердый шлак с золой и без золы	Золы
0,3	1,5...1,7	1,4...1,6	1,25...1,4
0,5	1,6...1,85	1,5...1,7	1,3...1,45
0,7	1,65...1,9	1,55...1,8	1,35...1,5

В России водозоловое соотношение в системах ГЗУ ТЭС составляет от 10 до 50 м³ воды на 1 т золошлаков [10]. Индийский ученый Рават считает, что при концентрациях твердых частиц в пульпе менее 60 % системы ГЗУ являются неэкономичными в связи с расходом большого количества воды и электроэнергии на перекачку пульпы [11]. С другой стороны, транспортирование высококонцентрированной пульпы может привести к образованию пробок в пульпопроводах.

Участки гидродинамической стабилизации потока.

Участок гидродинамической стабилизации следует за разгонным участком, в пределах которого скорость частиц возрастает от минимального значения в точке ввода золы до постоянного значения. Для снижения абразивного износа пульпопроводов рекомендуется местные сопротивления разделять прямолинейными участками и располагать их на расстоянии $l \geq (10...20) D$ друг от друга. При нарушении этого условия поток не успевает стабилизироваться, что приводит к росту гидродинамических потерь и повышению абразивного износа фасонных участков труб [12]. По данным [13] длина участка стабилизации потока равна:

$$L_{ст} = 40 * D ; \quad (1)$$

Согласно [14] суммарная длина участка стабилизации потока в трубопроводе до и после местного сопротивления должна удовлетворять условию:

$$L_{стоб} \geq 50 * D ; \quad (2)$$

Следует отметить, что интенсивному абразивному износу в соответствии с [15] подвержены участки стабилизации потока не по всей длине, а только в частях, непосредственно прилегающих к возмущающим элементам трубопроводов. Поэтому, чтобы избежать частого ремонта или замены наиболее изнашиваемых участков трубопроводов, необходимо непосредственно на входе в фасонные участки и на выходе из них устанавливать патрубки с антиабразивным покрытием или с повышенной износостойкостью длиной $5...10 D$ каждый.

Оптимизация формы фасонных участков пульпопроводов.

Т.к. наиболее изнашиваемыми участками пульпопроводов являются колена поворотов, тройники, переключатели и другая арматура, то при проектировании пульпопроводов их число должно быть принято минимально возможным, а фасонные участки должны иметь оптимальные характеристики с точки зрения абразивного износа и гидродинамики. На рис.2 представлены фасонные участки пульпопроводов с обозначением зоны максимального абразивного износа [12]



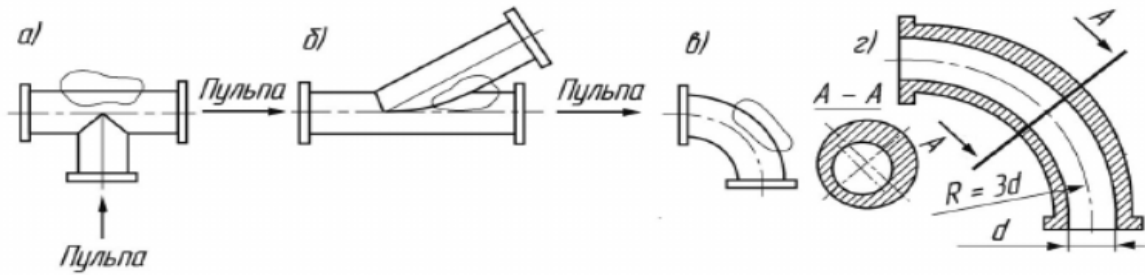


Рис.2. Фасонные участки пульпопроводов
Fig.2. Shaped sections of slurry pipelines

Форма диффузорного перехода с меньшего диаметра ступенчатого трубопровода на больший существенно влияет на величину потерь давления и абразивный износ как самого диффузорного перехода,

так и прилегающих к нему участков. В соответствии с [6] и [15] рекомендуемая форма перехода представлена на рис.3.

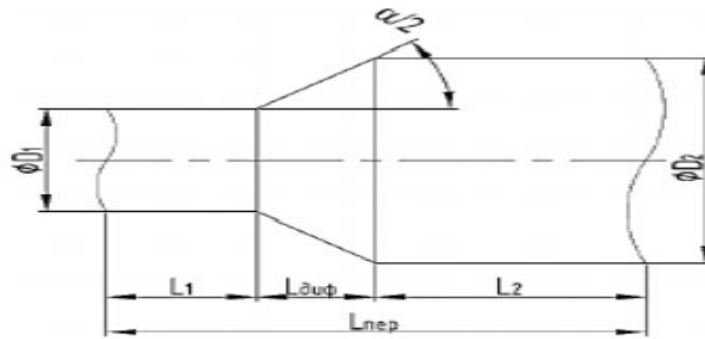


Рис.3. Форма диффузорного перехода с меньшего диаметра труб на больший при ступенчатом выполнении трубопроводов
Fig. 3 Diffuser transition from a smaller pipe diameter to a larger one with stepped pipelines

$L_{пер}$ – общая длина перехода с учетом длин участков гидродинамической стабилизации потока; $L_{диф}$ – длина диффузорного перехода; D_1 и D_2 – внутренние диаметры труб до и после диффузорного перехода; L_1 и L_2 – участки гидродинамической стабилизации потока до и после диффузорного перехода; α – угол диффузорного перехода.

Длина диффузорного перехода определяется из соотношения:

$$L_{диф} \geq \frac{D_2 - D_1}{2 * tg(\frac{\alpha}{2})} = \frac{D_2 - D_1}{0.263}; \quad (3)$$

где D_1 и D_2 – внутренние диаметры труб; α – угол диффузорного перехода.

Применение антиабразивных вставок в колена поворотов пульпопроводов.

При использовании антиабразивных вставок в фасонные участки трубопроводов скорость абразивного износа снижается. Снижение скорости износа зависит от материала вставок и на практике составляет не менее 20 % по сравнению с данными для таких же колен поворотов трубопроводов без вставок.

С развитием полимерных материалов активно стал применяться метод гуммирования, при котором

создается защитный слой из пластика или полиуретана. Данный метод применяется в горнодобывающей промышленности. Стальная труба в данном случае играет роль опалубки. Такой метод позволяет увеличить срок службы пульпопровода в 4-6 раз [16].

Также для футеровки трубопроводов используется высокотехнологичный материал, в состав которого входит высокоглиноземистый цемент. Данные материалы имеют высокую прочность и низкую истираемость. Они могут эффективно противостоять гидроабразивному износу, что отмечено авторами [17].

Применение камнелитых изделий.

Использование вставок из базальтового литья в фасонных участках и патрубках на участках гидродинамической стабилизации потока в пульпопроводах позволяет повысить их износо- и кислотостойкость.

Трубы и оборудование, футерованное камнем литьем, применяются как на российских, так и на зарубежных ТЭС. Достаточно подробная информация об опыте защиты оборудования некоторых электростанций, включая Троицкую ГРЭС, Томь-Усинскую ГРЭС, Сахалинскую ГРЭС и Рефтинскую ГРЭС, содержится в статье [18].



При анализе результатов эксплуатации пневмотранспортных установок было установлено, что межремонтный срок эксплуатации оборудования, защищенного каменным литьем, увеличивается в 4...6 раз. Использование каменного литья на металлургических предприятиях в количестве 30...36 тыс. т позволяет экономить 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 трубопроводах. Однако, применение труб с камнелитыми изделиями в условиях резко континентального климата на большей части России имеет следующие основные недостатки [19]:

1) растрескивание камнелитых вкладышей вследствие изменений геометрических размеров фасонных участков из-за высоких температурных перепадов в процессе эксплуатации и вылушивание отдельных фрагментов вкладышей в трубопровод, что зачастую приводит к его завалу;

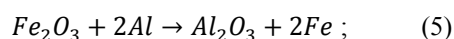
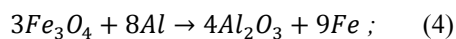
2) необходимость установки «мертвых опор» для жесткой фиксации фасонных участков трубопроводов во избежание негативных последствий, указанных в п.1;

3) необходимость установки температурных компенсаторов на прямолинейных участках трубопроводов 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 пневмотранспортных и гидротранспортных трубопроводов.

Использование труб с алюмотермическим покрытием.

Алюминотермия представляет собой технологию получения металлов и сплавов восстановлением оксидов металлов алюминием, которое происходит согласно реакциям с выделением большого количества теплоты:



Шихта из порошкообразных материалов засыпается в плавильную шахту или тигель и поджигается с помощью запальной смеси. Если при восстановлении выделяется много теплоты, осуществляется внепечная алюминотермия, без подвода тепла извне, развивается высокая температура (1900—2400°C), процесс протекает с большой скоростью, образующиеся металл и шлак хорошо разделяются. Если теплоты выделяется недостаточно, в шихту вводят подогревающую добавку или проводят плавку в дуговых печах (электропечная алюминотермия). В СССР электропечная алюминотермия была широко распространена. Алюминотермию применяют для получения низкоуглеродистых легирующих сплавов трудновос-

становимых металлов — титана, ниобия, циркония, бора, хрома и др., для сварки рельсов и деталей стального литья и для получения огнеупора — термит корунда. Алюминотермия открыта русским учёным Н.Н. Бекетовым (1859), в промышленности внепечной процесс освоен немецким химиком Г. Гольдшмидтом (1898) [20].

Нанесение алюмотермического покрытия на трубопроводы позволяет защитить их от абразивного износа, химической и высокотемпературной коррозии. Трубные изделия могут применяться для напорного гидро- и пневмотранспортирования различных абразивных материалов, в том числе в среде различных газов при температуре до 1000°C, а также химически агрессивных флюидов.

Первые работы по нанесению керамических и металлокерамических покрытий на внутреннюю поверхность металлических труб проводились в Институте структурной макрокинетики АН СССР (ИС-МАН, г. Черноголовка) в рамках развития технологий по методу самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [21]. Метод был разработан японскими исследователями [22] и в настоящее время за рубежом в промышленных масштабах методом центробежного СВС-литья трубы с алюмотермическим покрытием производят в КНР [19]. В СССР и затем в РФ неоднократно проводились опытно-производственные эксперименты по нанесению алюмотермических покрытий и применению труб с алюмотермическим покрытием на предприятиях энергетики и других отраслей промышленности.

Толщина износостойкого покрытия составляет 8...20 мм и регулируется количеством шихты засыпаемой в полость трубы.

Из упрочненных труб изготавливаются различные трубные колена, блоки трубопроводов посредством плазменно-дуговой резки труб на сектора, мерные участки и последующей сварки.

Износостойкое покрытие обладает высокими показателями микротвердости (2000...3000 кгс/мм²) и коррозионной стойкостью.

Срок службы труб после упрочнения увеличивается не менее чем в 8...10 раз по сравнению с неупрочненными. Это подтверждается длительным опытом эксплуатации упрочненных труб на имеющимся на Соколовско-Сарбайском горно-обогатительном комбинате при транспортировке железорудного концентрата.

С 1983 года началось интенсивное внедрение износостойких труб на электростанциях Павлодарской энергосистемы. Было освоено упрочнение внутренних поверхностей труб диаметрами 219, 273, 325, 420, 530 мм и изготовление из них трубных колен и блоков пневмо- и гидроизошлакопроводов, работающих в условиях интенсивного абразивного износа при транспортировании угольной пыли и сырого угля, золы изошлаковой пульпы. Отработан процесс упрочнения труб, находившихся в эксплуатации с остаточной толщиной стенки не менее 4 мм. Из упрочненных труб изготовлено и смонтировано



более 50 пылепроводов от сепараторов ММТ до горелок котлов БКЗ 420-149 Павлодарской ТЭЦ-3, тетки сырого угля; трубные колена и прямые участки на трубопроводы для транспортировки сухой золы Ермаковской ГРЭС, блоки пылезолопроводов и гидрозолошлакопроводов для Павлодарских ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, Ермаковской ГРЭС (ныне Аксусская электростанция, Казахстан) и Рефтинской ГРЭС.

В табл.1.1 приведены сравнительные свойства труб, изготовленных из серого чугуна, с использованием каменного литья и с алюмотермическими покрытиями согласно [23]. Сравнительные харак-

теристики алюмотермического покрытия с другими материалами (износостойкое каменное литье, серый чугун) демонстрируют, что алюмотермическое покрытие имеет лучшие характеристики, определяющие сопротивление износу (износостойкость в 15 раз выше по сравнению с литым базальтом, более высокая твердость). Испытания на теплостойкость показали устойчивость керамического покрытия при температуре 1200°C, а также удовлетворительную термостойкость (выдерживает термоудар не менее 2-х раз при погружении трубы с покрытием, имеющей температуру 800 °С в воду с температурой 20°C).

Сравнительные параметры труб с антиабразивными покрытиями
Comparative parameters of pipes with anti-abrasive coatings

Таблица 1.1

Table 1.1

Параметр	Алюмотермическое покрытие	Износостойкое каменное литье	Серый чугун СЧ 12-28
Толщина покрытия δ , мм	3...4	20	-
Плотность покрытия ρ , г/см ³	2,9	3,0	7,2
Водопоглощение W, %	0,09	0,13	не опред.
Предел прочности при сжатии $\sigma_{в. сж}$, МПа	300...340	250...500	500
Предел прочности при изгибе $\sigma_{в. изг}$, МПа	70...110	30...50	280
Ударная вязкость КС, кДж/м ²	1,50	1,25	3,00
Модуль упругости E, МПа	102000	100630	120000
Коэффициент Пуассона μ	0,25	0,25	не опр.
Износостойкость, г/см ²	0,02	0,30	0,79
Твердость по Моосу	8...9	7...8	не опр.
Микротвердость HV, ГПа	15...18	5...9	не опр.
Термостойкость, кол-во теплосмен от 800°C до 20°C на воздухе	не менее 10	1	не опр.
Термостойкость, количество теплосмен, закалка от 800°C до 20°C в воду	не менее 2	трескается	не опр.
Теплопроводность λ , Вт/(м·°C), при 20° C	2,10	1,52	51,00
Удельная теплоемкость C, кДж/(кг·°C) при 20°C	1,06	0,77	0,46
Температурный коэффициент линейного расширения при 20°C, 10-6К-1	8,1	83	132
Кислотостойкость, 20%-ная HCl, %	98	89	не опр.
Кислотостойкость, H ₂ SO ₄ (96%), %	99	97	не опр.

Керамическое покрытие в торцевой зоне устойчиво к воздействию электросварки (отсутствие сколов и разрушений), что позволяет производить соединение трубных элементов с керамическим покрытием не только посредством фланцев, но и электросварки.

Керамическое покрытие по сравнению с каменным литым материалом также имеет лучшую кислотостойкость в соляной и серной кислотах.

В настоящее время технология промышленного производства труб с алюмотермическим (керамическим) покрытием и фасонных участков является

освоенной. Покрытия наносятся на прямые трубы длиной до 2140 мм по ТУ 197257-002-12606601-2016 «Изделия стальные с износостойким керамическим покрытием», из которых также изготавливаются фасонные участки (отводы, тройники и крестовины) со следующими основными стандартными размерами:

1) прямые трубы с внешним диаметром от 60 до 530 мм и толщиной керамического (алюмотермического) покрытия 8,5±0,5 мм.

2) различные углы поворота потока фасонных участков.



Трубы с алюмотермическим покрытием применяются в системах гидрозолаудаления Павлодарских ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 с 1983 г., пылеподачи Рефтинской ГРЭС с 1984 г. и пневмозолаудаления Аксусской ЭС с 1989 г. (ранее – Ермаковская ГРЭС). Кроме того, прямые и фасонные участки пылепроводов с алюмотермическим покрытием также успешно используются на следующих предприятиях:

– АО «Челябинский цинковый завод»: пневмотранспорт прокаленной вельцоокси.

– ООО «Тобольскнефтехим»: пневмотранспорт катализатора, температура до 650°C; циклоны Ø140-331x12, высота 556 мм, сталь 12X18H10T.

– ОАО «Мальшевское рудоуправление»: струйные мельницы измельчения слюды; разгонные трубки Ø67x8 мм, длина 600 мм.

– АО «Невинномысский Азот»: пневмотранспорт катализатора; $t=450^{\circ}\text{C}$; отводы 45° и 90°, радиус 450-800 мм, труба Ø102 мм.

– ООО «Гермес», г. Красноярск: гидротранспорт глинозема; различные элементы из труб Ø146; 127; 95 и 89.

В настоящее время отсутствуют данные о замене или ремонте ранее установленных участков трубопроводов с алюмотермическим покрытием, так как их эксплуатация продолжается. Это объясняется тем, что трубопроводы с алюмотермическим покрытием обладают существенно большей абразивной стойкостью по сравнению с трубопроводами, выполненными из других материалов. Причем, следует подчеркнуть, что это относится не только к прямолинейным, но и к фасонным участкам трубопроводов. Оценочный срок службы трубопроводов с алюмотермическим покрытием по мнению представителей предприятия-изготовителя не менее, чем в 10 раз больше по сравнению с трубопроводами, выполненными из стали марки Ст.5. На основании исследований авторов [19] величина коэффициента относительной износостойкости труб с алюмотермическим покрытием находится в диапазоне 300...400. Относительная износостойкость трубопроводов из различных материалов приведена в табл.1.2.

Таблица 1.2

Относительная износостойкость трубопроводов из различных материалов

Table 1.2

Relative wear resistance of pipelines made of various materials

Материал трубопровода	Твердость по Виккерсу HV, единицы	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 (отж.)	217	1,59
Серый чугун	223	1,66
Сталь 30ХГС, Сталь 30ХГСА (отж.)	229	1,74
Сталь 55Л (с термообработкой)	240	1,90
Сталь 45	241	1,92
Сталь 30X13	270	2,41
Сталь 40X13	300	3,04
Сталь 55Л	340	4,05
Сталь X5CrNi189	380	5,27
Трубы с алюмотермическим покрытием	2500	364,00

В России компания ООО "Энергохимкомплект" занимается нанесением керамического, термоизносостойкого покрытия для агрессивных

сред и высоких температур на основе корунда Al_2O_3 . Некоторые результаты работ представлены на рис.4-5 [24, 25].





Рис.4. Вид тройника $\varnothing 108$ мм с нанесенным алюмотермическим покрытием

Fig.4. The tee $\varnothing 108$ mm with applied aluminothermic coating



Рис.5. Трубы $D=114$ мм с нанесенным алюмотермическим покрытием.

Fig.5. Pipes with $D = 114$ mm with aluminothermic coating

Тем не менее, следует отметить, что масштабного промышленного применения труб с алюмотермическим покрытием в энергетике и различных отраслях промышленности России до настоящего времени нет, несмотря на примеры их высокоэффективного применения для гидропневмотранспорта промышленной пыли, угольной пыли и золошлаков энергетики и других абразивных полидисперсных материалов с 1983 г. на территории России и Казахстана.

Заклучение

В результате абразивного износа оборудования ухудшаются технико-экономические показатели систем гидрозолоудаления ТЭС. Для снижения абразивного износа оборудования гидротранспортных установок следует применять режимные и конструктивные мероприятия.

К режимным мероприятиям, не требующих инвестиций в реконструкцию действующих гидротранспортных установок, относятся: поворот прямолинейных горизонтальных и наклонных участков пульпопроводов вокруг своей оси; транспортирование пульпы с оптимальными параметрами.

К конструктивным мероприятиям, в разной мере требующих инвестиций в реконструкцию гидротранспортных установок, относятся: оптимизация формы фасонных участков пульпопроводов; выполнение участков гидродинамической стабилизации пульпы на входе и выходе из фасонных участков пульпопроводов с учетом зоны максимального износа; применение антиабразивных вставок в колена поворотов пульпопроводов; применение камнелитых изделий; использование труб с алюмотермическим покрытием.

Максимальная эффективность внедрения противоабразивных рекомендаций достигается при сочетании режимных и конструктивных мероприятий. При этом следует подчеркнуть, что применение труб с алюмотермическим покрытием для установки на наиболее изнашиваемых прямолинейных участках и изготовления фасонных участков трубопроводов позволяет снизить вероятность остановов систем золоудаления по причине абразивного износа в 100 раз и более, а применение камнелитых изделий для тех же целей – не более чем в 10 раз по

сравнению с обычно используемыми материалами для строительства трубопроводов.

Альтернативы применению труб и фасонных элементов с алюмотермическим покрытием для эффективного повышения межремонтного срока эксплуатации установок пневмо- и гидротранспорта золошлаков энергетики вследствие абразивного износа в настоящее время нет не только в России, но и в мировой практике.

Список литературы

1. Putilov V.Y., Putilova I.V., Feuerborn H.-J. The influence of terminology on the effective solution of the coal ash handling problem // Intern. Conf. with Elements of School for Young Scientists on Recycling and Utilization of Technogenic Formations // KnE Materials Sci. 2017. P. 133–140. <https://doi.org/10.18502/kms.v2i2.959>
2. Золошлаки энергетики – статус и определения / В.Я. Путилов, И.В. Путилова, Н.А. Зройчиков, Х.-Й. Фюрборн // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 1–3. С. 73–83. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.01-03.073-083>
3. Оценка влияния абразивного износа на срок службы гидротранспортных трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС / Н.А. Зройчиков, В.Я. Путилов, И.В. Путилова, С.А. Фадеев, Е.А. Маликова // Теплоэнергетика, 2020, № 9, с. 35–45.
4. Оценка влияния абразивного износа на срок службы гидротранспортных трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС. Н. А. Зройчиков, И. В. Путилова, С. А. Фадеев, Е. А. Маликова.
5. Путилов В.Я.; Путилова И.В. Зависимость абразивного износа пылепроводов пневмотранспортных установок ТЭС от химико-минералогического состава транспортируемых материалов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2007. - №2. - С.61-65.
6. Путилов В.Я.; Прохоров В.Б.; Путилова И.В. Рекомендации по снижению износа пылепроводов при пневмотранспорте абразивных мелкодисперсных сыпучих материалов // Вестник МЭИ. – 2003. - №3. - С.29-33.
7. Тепловые и атомные электрические станции / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. –М.: Энергоатомиздат, 1995. – 415 с.
8. Рекомендации по расчету гидроабразивного износа пульпопроводов и насосов систем гидрозолоудаления ТЭС: П 09-83/ВНИИГ / ВНИИ гидротехники им.



Б. Е. Веденева, АН ГССР, Ин-т горн. механики им. Г. А. Цулукидзе. - Л.: ВНИИГ, 1984. - 82 с.: ил.

9. Угинчус А.А. Гидравлика и гидравлические машины: учебник для машиностроит. специальностей вузов / А. А. Угинчус. – М.: Азбук., 2009. – 396 с.

10. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник / В.В. Абрамов М.Г. и др.; под общей ред. В.Я. Путилова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007 – 388 с.: ил.

11. https://www.researchgate.net/publication/319301425_Flow_characteristics_of_high_concentration_fly_ash_slurries_through_pipelines

12. <http://pandia.ru/text/80/197/53147-6.php>

13. http://www.ntpo.com/patents_extraction/extraction_1/extraction_577.shtml

14. Б.Л. Вишня, В.Я. Путилов. Методические указания по проектированию систем пневмозолоудаления золы от котлоагрегатов, установок отпуска сухой золы потребителям и отгрузки ее на насыпные золоотвалы. РД 34.27.109-96., Екатеринбург, УРАЛТЕХЭНЕРГО, 1997, 119 с.

15. 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.

16. Копченков В.Г., Пенкин Н.С., Сербин В.М. Повышение долговечности пульпопроводов и трубопроводной арматуры методом гуммирования // Обогащение руд. 2009. № 4. С. 33-38.

17. Макароничев А.Г., Беляева С.В. Защита пульпопроводов от гидробразивного износа / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого / Статья в сборнике трудов конференции Неделя науки СПбПУ, Санкт-Петербург, 19-24 ноября 2018 г., с. 279-281.

18. <https://xn--clahwb.xn--p1ai/menyu-1/bazaltovye-tehnologii/>

19. 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.

20. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8E%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8%D1%8F>

21. Мержанов А. Г., Юхвид В. И., Боровинская И. П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез литых тугоплавких неорганических соединений // Доклады АН СССР. – т. 255. - №1. – 1980. – с. 120-124.

22. Химия синтеза сжиганием / Ред. М. Коидзуми. Пер. с японск. – М.: Мир, 1998. – 247 с.

23. А.М. Белошицкий, Е.Н. Ильин, А.С. Прокопьев и др. Износостойкие трубопроводы с алюмотермическим покрытием на основе корунда // Материалы V конференции «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 24–25 апреля 2014 г. — М.: Полиграфический центр МЭИ, 2014. с. 103 – 106.

24. <http://www.myshared.ru/slide/984524/>

25. <https://ehk.ru/uslugi/termo-iznosostoykie-keramicheskie-pokrytiya/>

References

1. Putilov V.Y., Putilova I.V., Feuerborn H.-J. The influence of terminology on the effective solution of the coal ash handling problem // Intern. Conf. with Elements of School for Young Scientists on Recycling and Utilization of Technogenic Formations // KnE Materials Sci. 2017.P.133–140. <https://doi.org/10.18502/kms.v2i2.959>

2. Zoloshlaki ehnergetiki – status i opredele-niya / V.YA. Putilov, I.V. Putilova, N.A.Zroichikov, KH.-I. Foerborn // Al'ternativnaya ehnergetika i ehkologiya. 2017. №1–3. p.73-83

<https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.01-03.073-083>

3. Otsenka vliyaniya abrazivnogo iznosa na srok sluzhby gidrotransportnykh truboprovodov si-stem zoloshlakoudaleniya TEHS / N.A. Zroichikov, V.YA. Putilov, I.V. Putilova, S.A. Fadeev, E.A. Malikova // Teploehnergetika, 2020, № 9, p. 35–45.

4. Otsenka vliyaniya abrazivnogo iznosa na srok sluzhby gidrotransportnykh truboprovodov si-stem zoloshlakoudaleniya TEHS. N. A. Zroichikov, I. V. Putilova, S. A. Fadeev, E. A. Malikova.

5. Putilov V.YA.; Putilova I.V. Zavisimost' abrazi-vnogo iznosa pyleprovodov pnevmotrans-portnykh ustanovok TEHS ot khimiko-mineralogicheskogo sosta-va transportiruemykh materialov // Ehnergoberezhnie i vodopodgotovka. – 2007. - №2. - p.61-65.

6. Putilov V.YA.; Prokhorov V.B; Putilova I.V. Rekomendatsii po snizheniyu iznosa pyleprovodov pri pnevmotransporte abrazivnykh melkodispersnykh sypuchikh materialov // Vestnik MEHI. – 2003. - №3. - p.29-33.

7. Teplovye i atomnye ehlektricheskie stantsii / L.S. Serman, V.M. Lavygin, S.G. Tishin. –М.: Ehnergoatomizdat, 1995. – 415 p.

8. Rekomendatsii po raschetu gidroabrazivnogo iznosa pul'poprovodov i nasosov sistem gidrozolo-udaleniya TEHS: P 09-83/VNIIG / VNII gidrotekhniki im. B. E. Vedeneva, AN GSSR, In-t gorn. mekha-niki im. G. A. Tsulukidze. - L.: VNIIG, 1984. - 82 p.: il.

9. Uginchus A.A. Gidravlika i gidravlicheskie mashiny: uchebnik dlya mashinostroit. spetsial'no-stei vuzov / A. A. Uginchus. – М.: Азбук., 2009. – 396 p.

10. Sovremennye prirodookhrannye tekhnologii v ehlektroehnergetike: Informatsionnyi sbornik / V.V. Abramov M.G. i dr.; pod obshchei red. V.YA. Puti-lova. М.: Izdatel'skii dom MEHI, 2007 – 388 p.: il.

11. https://www.researchgate.net/publication/319301425_Flow_characteristics_of_high_concentration_fly_ash_slurries_through_pipelines

12. <http://pandia.ru/text/80/197/53147-6.php>

13. http://www.ntpo.com/patents_extraction/extraction_1/extraction_577.shtml

14. B.L. Vishnya, V.YA. Putilov. Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu sistem pnevmozoloudaleniya zoly ot kotloagregatov, ustanovok otpuska sukhoi zoly potrebitelyam i otgruzki ee nasypnye zolootvaly. RD 34.27.109-96., Екатеринбург, УРАЛ-ТЕКНЕХЭНЕРГО, 1997, 119 p.



15. RD 153-34.1-27.512-2001. Metodicheskie ukazaniya po raschetu i rekomendatsii po snizheniyu abrazivnogo iznosa pnevmotransportnykh truboprovodov sistem pyleprigotovleniya i zoloshlakoudaleniya TEHS / V.YA. Putilov, I.V. Putilova, B.L. Vishnya i dr. M.: MEHI (TU), 2001.

16. Kopchenkov V.G., Penkin N.S., Serbin V.M. Povyshenie dolgovechnosti pul'poprovodov itruboprovodnoi armatury metodom gummiro-vaniya // Obogashchenie rud. 2009. № 4. p. 33-38.

17. Makaronichev A.G., Belyaeva S.V. Zashchita pul'poprovodov ot gidroabrazivnogo iznosa/ Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo / Stat'ya v sbornike trudov konferentsii Nedelya nauki SPBPU, Sankt-Peterburg, 19-24 noyabrya 2018 g., p. 279-281

18. <https://xn--clahwb.xn--plai/menyu-1/bazaltovye-tehnologii/>

19. Putilova I.V., Putilov V.YA. Otsenka mezhremontnogo sroka ehkspluatatsii truboprovodov ustanovok pnevmotransporta zoly i ugol'noi pyli TEHS i rek-

omendatsii po ego povysheniyu // Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii «Mir ugol'noi zolY», 7 – 10 maya 2007 g., Kovington, Kentukki, SSHA.

20. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8E%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8%D1%8F>

21. Merzhanov A. G., Yukhvid V. I., Borovinskaya I. P. Samorasprostranyayushchiysya vysokotemperaturnyi sintez litykh tugoplavkikh neorganicheskikh soedinenii // Doklady AN SSSR. – t. 255. - №1. – 1980. – p. 120-124.

22. Khimiya sinteza szhiganiem / Red. M. Koidzumi. Per. s yaponsk. – M.: Mir, 1998. – 247 p.

23. A.M. Beloshitskii, E.N. Il'in, A.S. Proko-p'ev i dr. Iznosostoikie truboprovody s alyumo-termicheskim pokrytiem na osnove korunda // Materialy V konferentsii «Zoloshlaki TEHS: udalenie, transport, pererabotka, skladirovaniE», Moskva, 24–25 aprelya 2014 g. — M.: Poligraficheskii tsentr MEHI, 2014. p. 103 – 106.

24. <http://www.myshared.ru/slide/984524/>

25. <https://ehk.ru/uslugi/termo-iznosostoykie-keramicheskie-pokrytiya/>



Транслитерация по BSI



STI 2021: Международная научно-практическая конференция «Новые горизонты устойчивого развития: наука, технологии, инновации»

**Россия, Смоленск
19 апреля—23 апреля 2021**

Приглашаем Вас принять участие в Международной научно-практической конференции «Новые горизонты устойчивого развития: наука, технологии, инновации», которая пройдет 19-23 апреля 2021 г. в Смоленском государственном университете (г. Смоленск, Россия).

Цель конференции – глубокий теоретический анализ понятия «устойчивое развитие» применительно к экосистеме науки, технологий и инноваций, а также разработка практических рекомендаций по созданию механизма их взаимного участия и тесного сотрудничества в модернизации управленческой пирамиды по линии «общество – территория – населенный пункт».

В работе конференции примут участие ученые, педагогические работники, заинтересованные специалисты, представители органов исполнительной и законодательной власти, ответственные за поддержание естественной среды, а также формирование производственной и социальной инфраструктуры территории. Участникам и слушателям представится возможность активного участия в конференции путем свободного обмена мнениями и конструктивной полемики с научными работниками, экспертами и специалистами соответствующих отраслей знания.

проконференции.рф

