МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
ИМЕНИ Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

АКАДЕМИЯ НАУК
ГРУЗИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ГОРНОЙ
МЕХАНИКИ ИМЕНИ
Г. А. ЦУЛУКИДЗЕ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ГИДРОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ПУЛЬПОПРОВОДОВ И НАСОСОВ СИСТЕМ ГИДРОЗОЛОУДАЛЕНИЯ ТЭС

П 09—83
ВНИИГ

ЛЕНИНГРАД
1984

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
ИМЕНИ Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

АКАДЕМИЯ НАУК
ГРУЗИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ГОРНОЙ
МЕХАНИКИ ИМЕНИ
Г. А. ЦУЛУКИДЗЕ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ГИДРОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ПУЛЬПОПРОВОДОВ И НАСОСОВ СИСТЕМ ГИДРОЗОЛОУДАЛЕНИЯ ТЭС

П 09—83
ВНИИГ

ЛЕНИНГРАД
1984

УДК 621.182.9

«Рекомендации по расчету гидроабразивного износа пульпопроводов и насосов систем гидрозолоудаления ТЭС» предназначены для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами гидроабразивного износа гидротранспортного оборудования и борьбы с этим явлением. Приведенная в Рекомендациях методика позволяет обоснованно рассчитать срок службы пульпопроводов и багерных насосов ТЭС, выбрать мероприятие для защиты от гидроабразивного износа этих элементов и оценить экономическую эффективность принятого решения.

В качестве мероприятий по защите от изнашивания трубопроводов и насосов рекомендуется применять как технологические приемы, так трубы и облицовки из современных высокопрочных материалов.

В Рекомендациях приведены практические примеры использования предлагаемой методики расчета применительно к вариантам, часто встречающимся в практике проектирования систем гидрозолоудаления ТЭС.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева (ВНИИГ), 1984

ВВЕДЕНИЕ

На тепловых станциях Советского Союза в постоянной эксплуатации находится более 4,5 тыс. км труб, по которым удаляется около 90 млн. т золошлаковых материалов в год. Для перекачивания золошлаковой пульпы используется не менее 1000 грунтовых насосов. Эти трубопроводы и насосы подвергаются интенсивному абразивному износу. Так, в период 1964—1967 гг. ежегодно на замену изношенных трубопроводов системы гидрозолоудаления по Минэнерго СССР затрачивалось до 15 тыс. т труб, а в настоящее время эта цифра увеличилась в 1,5—2 раза. Багерные насосы, как правило, заменяются после 3000—4000 ч работы, а ремонтируются из-за износа в этот период несколько раз. Поэтому расчет и прогнозирование величины износа трубопроводов и насосов систем гидрозолоудаления ТЭС и своевременная разработка способов их защиты имеет большое народнохозяйственное значение и после внедрения в практику эксплуатации принесет значительный экономический эффект. В отечественной и зарубежной технической литературе рассматриваемому вопросу уделено очень мало внимания, а нормативные документы в системе Минэнерго, позволяющие рассчитать величину абразивного износа пульпопроводов и насосов, практически отсутствуют. Поэтому при проектировании систем гидрозолоудаления расчет абразивного износа основных элементов системы, как правило, не выполняется, а срок службы насосов и трубопроводов в лучшем случае оценивается ориентировочно по аналогии с эксплуатационными данными, полученными по системам удаления, работающим часто в иных эксплуатационных условиях.

В 1977—1980 гг. лаборатория экологической технологии удаления золошлаков ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева совместно с лабораторией гидропневмотранспорта и гидромеханизации ИГМ им. Г. А. Цулукидзе АН ГССР провели исследования процесса абразивного износа насосов и трубопроводов транспортируемым золошлаковым материалом различных видов твердого топлива.

Настоящие Рекомендации разработаны в лаборатории экологической технологии удаления золошлаков ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева канд. техн. наук М. В. Печенкиным и инж. Э. Л. Добкиным и в лаборатории гидропневмотранспорта и гидромеханизации ИГМ им. Г. А. Цулукидзе АН ГССР канд.

техн. наук Т. Ш. Гочиташвили. В составлении Рекомендаций принимали участие: от ВНИИГ канд. техн. наук В. Г. Пантелеев, инж. Э. А. Ларина (приложение 2), канд. техн. наук В. Г. Пантелеев (приложение 4), от ИГМ канд. техн. наук Л. И. Махарадзе (приложение 8), инж. Т. Ш. Цамалашвили (приложение 3).

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Область применения

1.1. Настоящие Рекомендации регламентируют вопросы расчета гидроабразивного износа пульпопроводов и багерных насосов систем гидрозолоудаления тепловых электрических станций при удалении по трубопроводам:

а) твердого и жидкого шлака:

б) золы;

в) совместно золы и шлака.

1.2. Рекомендации предназначены для расчета величины износа, срока службы трубопровода и рабочих элементов багерного насоса, а также разработки защитных мероприятий по повышению срока их службы и оценки экономической эффективности принятых решений.

1.3. Приведенный ниже метод расчета гидроабразивного износа пульпопроводов и багерных насосов построен на основе изучения процесса гидроабразивного изнашивания конструкционных материалов твердыми частицами потока пульпы в лабораторных и промышленных условиях (приложение 1).

Терминология

1.4. При выполнении расчетов гидроабразивного износа пульпопроводов и багерных насосов следует придерживаться следующей терминологии.

Золошлаковый материал (золошлаковая смесь, продукты сгорания угля) — смесь отходов, оставшихся после сгорания в топке котла твердого топлива.

Внесены Всесоюзным ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательским институтом гидротехники им. Б. Е. Веденеева и Институтом горной механики им. Г. А. Цулукидзе	Утверждены решением ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева № 9 от 20 января 1983 г. по согласованию с Главниипроектом Минэнерго СССР	Срок введения II квартал

Зола (летучая зола, зола-унос) — частицы золошлакового материала, которые выносятся дымовыми газами из топки котла и улавливаются золоуловителями.

Шлак — частицы золошлакового материала крупностью более 0,25 мм, которые образуются в топке котла и скапливаются по мере сгорания топлива в шлакосборниках; шлак твердый (сухой) — частицы золошлакового материала, удаляемые из топки котла в твердом состоянии; шлак жидкий (расплавленный) — золошлаковый материал, удаляемый из топки котла в жидком состоянии и твердеющий после охлаждения в шлаковой ванне.

Золошлаковая, золовая, шлаковая пульпа (гидросмесь) — смесь золошлакового материала или золы, шлака с водой.

Пульпопровод (пульповод, золошлакопровод, золопровод, шлакопровод) — трубопровод, по которому транспортируется золошлаковая, золовая, шлаковая пульпа.

Багерный насос (пульпонасос) — агрегат, предназначенный для перекачивания по пульпопроводу золошлаковой, золовой, шлаковой пульпы.

Весовая (массовая) расходная концентрация (консистенция) пульпы ($S_{ср}$) — мера содержания твердого в пульпе, определяемая отношением массы золошлакового материала в единице объема пульпы к сумме этой массы и массы воды в данном объеме. Концентрация может выражаться в г/л, т/м^3, % и соотношением Т : Ж, где Т — одна часть твердого, Ж — соответствующее количество частей воды. Скорость (v м/с) потока золошлаковой пульпы — средняя по поперечному сечению трубы. Скорость пульпы ($v_{ср}$) определяется отношением расхода пульпы к площади поперечного сечения трубопровода; критическая скорость движения золошлаковой пульпы ($v_{кр}$) — наименьшая скорость v потока пульпы, при которой на дне трубы начинает образовываться неподвижный слой выпавших из потока частиц золошлака.

Гидроабразивный износ (изнашивание) материала трубопроводов и насосов золошлаковой пульпой — процесс, при котором частицы золошлакового материала пульпы внедряются в твердые поверхности, ограничивающие поток, и образуют на них необратимые деформации при относительном движении пульпы.

Классификация систем гидрозолоудаления

1.5. Необходимо различать следующие системы гидрозолоудаления (ГЗУ): совместную, когда при удалении золы и шлака осуществляется смешение золовой и шлаковой пульпы, которая транспортируется по общим пульпопроводам и поступает в один отвал, и раздельную, когда удаление золы и шлака осуществляется без смешения и транспортирование золовой и шлаковой пульпы производится по отдельным пульпопроводам, а складирование — на разных отвалах.

Раздельная система ГЗУ применяется при соответствующем технико-экономическом обосновании или при наличии реальных потребителей золы или шлака ТЭС.

Общие требования, предъявляемые к расчету гидроабразивного износа пульпопроводов и багерных насосов

1.6. Расчет гидроабразивного износа пульпопроводов и багерных насосов следует выполнять одновременно с гидравлическим расчетом, который проводится в соответствии с «Рекомендациями по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта золошлаковых материалов» (П 61-77/ВНИИГ, Л., 1977).

1.7. На основе гидравлического расчета и технико-экономического сопоставления вариантов с учетом результатов расчета гидроабразивного износа пульпопровода и багерных насосов должны быть обоснованы выбор варианта (совместной или раздельной) системы гидрозолоудаления, число пульповодов и багерных насосов, оптимальная концентрация пульпы и необходимость ее сгущения, необходимость и способ антиабразивной защиты пульпопроводов и багерных насосов, периодичность ремонтов изнашиваемого оборудования и поворачивания пульпопроводов.

1.8. По результатам расчета и выбора варианта системы ГЗУ должен быть откорректирован выполненный ранее гидравлический расчет пульпопроводов.

1.9. При выполнении расчета гидроабразивного износа следует учитывать:

а) выход и крупность материала, подлежащего транспортированию (зола, шлак, золошлаковая смесь);

б) расход и скорость транспортирования материала;

в) концентрацию пульпы;

г) диаметр и длину пульпопроводов;

д) материал и толщину стенок пульпопроводов;

е) вертикальные и горизонтальные углы поворота трассы пульпопроводов.

2. РАСЧЕТ СРОКА СЛУЖБЫ ПУЛЬПОПРОВОДОВ СИСТЕМ ГЗУ

2.1. Расчетную толщину износа стенок проектируемых пульпопроводов (мм) следует определять по зависимости:

$$\delta = \frac{T_р}{t_1}, \qquad (1)$$

где $T_р$ — расчетный срок службы пульпопровода, год; t_1 — удельное время работы пульпопровода при износе толщины стенки трубы в среднем на 1 мм, год/мм.

2.2. Определение значений t_1 при транспортировании по трубопроводу золы, жидкого и твердого шлака (при наличии дробилок) и золошлака выполняется по зависимости:

$$t_1 = \frac{T_{ан}}{\delta_{и.ан}} \cdot \frac{n\psi}{n_{ан}\psi_{ан}} \cdot \frac{k_{д.ан} \cdot k_и}{k_д \cdot k_{и.ан}} \cdot \frac{\rho_{ан}}{\rho_т} \cdot \left(\frac{v_{ан}}{v_{ср}}\right)^{2,5} \cdot \left(\frac{S_{ан}}{S_{ср}}\right)^{0,65} \cdot \left(\frac{d_{ан}}{d_{ср}}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{D_{ан}}{D}\right)^{0,3}, \qquad (2)$$

Характеристика

Транспортируемый материал	$v_{ан}$, м/с	$\rho_{ан}$, г/см³	$S_{ан}$, %	$d_{ан}$, мм
Жидкий шлак	1,8	2,5—2,7	2,5—4,5	8,2
Твердый шлак	1,5	2,2	3,0—5,0	2,96
Зола	1,2	2,6	6,0—10,0	0,073
Золошлак (ж. шлак+зола)	1,8	2,6	4,0—6,0	3,42
Золошлак (т. шлак+зола)	1,5	2,5	4,0—6,0	0,50

Примечание. Меньшие значения $k_{а.ан}$ в таблице относятся к топливам с менее канско-ачинские и т. д.), а большие — к топливам с относительно прочными продуктами

где $T_{ан}$ — время работы пульпопровода-аналога до предельного износа, год, определяется по результатам статистической обработки данных натурных наблюдений эксплуатируемого пульпопровода-аналога; за аналог следует принимать трубопровод, по которому транспортируется золошлаковый материал, идентичный по физико-механическим свойствам и технико-гидравлическим условиям транспортирования материалу, который предполагается удалять по проектируемому трубопроводу (идентичность устанавливается с учетом данных табл. 1, табл. 4, приложения 2 и результатов предварительных гидравлических расчетов системы);

$\delta_{и.ан}$ — фактический износ (по толщине) стенок трубопровода-аналога за время $T_{ан}$, мм;

$n_{ан}$, n — число рабочих положений соответственно аналогового и рассчитываемого пульпопровода до предельного износа трубы;

$\psi_{ан}$, ψ — коэффициенты неравномерности износа по окружности соответственно аналогового и рассчитываемого пульпопровода.

$k_{а.ан}$, $k_а$ — коэффициенты относительной абразивности соответственно эталонного и транспортируемого материала, определяются по данным табл. 3 или экспериментально в соответствии с рекомендациями, изложенными в приложении 3;

$k_{и.ан}$, $k_и$ — коэффициенты относительной износостойкости соответственно эталонного и используемого конструкционного материала, определяются по данным табл. 7.

$v_{ан}$, $S_{ан}$, $d_{ан}$, $\rho_{ан}$, $D_{ан}$ — скорость и массовая концентрация пульпы, крупность и плотность абразивных частиц, диаметр трубопровода (с размерностями м/с, кг/кг, мм, г/см³, м — соответственно) принятого условно эталонным, с известными указанными параметрами;

$v_{ср}$ — средняя скорость движения пульпы в трубопроводе, м/с, задается по данным гидравлического расчета;

$S_{ср}$ — средняя массовая концентрация пульпы, задается на основании технологических данных, кг/кг;

$\rho_т$ — плотность транспортируемого твердого материала, г/см³, задается на основании технологических данных;

$d_{ср}$ — средневзвешенная крупность транспортируемых частиц, мм, задается на основании технологических данных;

D — диаметр пульпопровода, м, задается на основании гидравлического расчета.

Таблица 1

трубопровода-аналога

$D_{ан}$, м	$\delta_{и.ан}$, мм	$n_{ан} \cdot \psi_{ан}$	$k_{и.ан}$	$k_{а.ан}$	$T_{ан}$, год	$K_{ан}$
0,35—0,4	8—10	2—3	1,0	1,0—1,3	4—3	0,047
0,35—0,4	8—10	2—3	1,0	0,6—0,8	5—5,5	0,043
0,35—0,4	8—10	2—3	1,0	0,25—0,50	10—12	0,038
0,35—0,4	8—10	2—3	1,0	0,8—1,00	5—4	0,075
0,35—0,4	8—10	2—3	1,0	0,45—0,60	8—6	0,043

прочными продуктами сгорания (угли кузнецкие, львовско-волынские, челябинские, сгорания (угли донецкие, экибастузские, кизиловские и т. п.).

2.3. Значения ψ определяются по данным табл. 2 в зависимости от величины угла сектора максимального износа.

Таблица 2

Зависимость ψ от угла сектора максимального износа

Угол сектора максимального износа $\varphi_{макс}$, град	0—45	45—90	90—120	120—180	>180
Рекомендуемый угол поворота труб φ, град	60	90	120	180	—
Значения ψ	0,50	0,60	0,65	0,75	1,00

Угол сектора максимального износа $\varphi_{макс}$ для проектируемых пульпопроводов ориентировочно можно определить по зависимости

$$\varphi_{макс} = \varphi_0 k_\varphi \sqrt{\frac{\rho_{ан}}{\rho_к}} \cdot S_{ср} \cdot \frac{v_{ср}}{v_{кр}} \cdot e^{-3{,}6 S_{ср}}, \qquad (3)$$

где k_φ — коэффициент угла наклона пульпопровода к горизонту (табл. 6); $\varphi_0 = 980°$ — эмпирический коэффициент для золошлаковых материалов (при наличии дробилок); $\rho_к = 2{,}65$ г/см^3 — плотность эталонного кварцевого песка.

2.4. Определение значений t_1 при отсутствии данных о трубопроводе-аналоге, более близком по своим характеристикам к рассчитываемым трубопроводам, выполняется по зависимости:

$$t_1 = \frac{K_{ан} \cdot n \cdot \psi k_и}{k_а \cdot v_{ср}^{2,5} \cdot S_{ср}^{0,65} \cdot D^{0,3}}, \qquad (4)$$

где $K_{ан}$ — коэффициент, учитывающий фактический срок службы трубопровода-аналога до износа его стенок на 1 мм при определенных условиях эксплуатации; значения $K_{ан}$, определенные по результатам статистической обработки данных промышленных наблюдений за износом эксплуатируемых пульпопроводов при трубах из малоуглеродистой стали, выбираются по табл. 1 в зависимости от вида транспортируемого материала;

n — число рабочих положений трубопровода;

ψ — коэффициент неравномерности износа стенок пульпопровода, определяется с учетом износа труб по окружности по данным табл. 2.

2.5. При проектировании сравнительно длинных (более 5 км) трасс, а также наклонных участков пульпопроводов расчеты по

Таблица 3

Значения коэффициента относительной абразивности золошлаковых материалов

Транспортируемый материал	Промышленный объект	Значения коэффициента k_a
Песок нормальный для испытания цементов по ГОСТу 6139-78 (эталон)	з-д «Красный Октябрь», г. Вольск	1,0
Жидкий шлак кузнецкого угля (без дробления)	Ленинградская ТЭЦ-17	6,5
Золошлак (20% ж. шлака+80% золы)	Ленинградская ТЭЦ-17	1,6
Зола эстонского сланца	Прибалтийская ГРЭС	0,3
Твердый шлак эстонского сланца	Прибалтийская ГРЭС	0,31
Зола фрезерного торфа	Рижская ТЭЦ	0,6
Золошлак фрезерного торфа (50% т. шлака+50% золы)	Рижская ТЭЦ	0,68
Твердый шлак экибастузского угля	Троицкая ГРЭС	0,46
Золошлак экибастузского угля (50% т. шлака+50% золы)	Троицкая ГРЭС	0,43
Золошлак экибастузского угля (20% т. шлака+80% золы)	Троицкая ГРЭС	0,41
Жидкий шлак львовско-волынских углей	Бурштынская ГРЭС	1,0
Зола львовско-волынских углей	Бурштынская ГРЭС	0,42
Золошлак львовско-волынских углей (20% ж. шлака+80% золы)	Бурштынская ГРЭС	0,68
Зола канско-ачинских углей	Красноярская ТЭЦ-1	0,22
Зола печорского угля	Интинская ТЭЦ	0,20
Твердый шлак печорского угля (без дробления)	Интинская ТЭЦ	3,1
Золошлак печорского угля (20% т. шлака+80% золы)	Интинская ТЭЦ	1,6
Зола донецкого угля	Старобешевская ГРЭС	0,44
Твердый шлак донецкого угля (без дробления)	Старобешевская ГРЭС	3,48
Золошлак донецкого угля (20% т. шлака+80% золы)	Старобешевская ГРЭС	2,75
Зола воркутинского угля	Воркутинская ТЭЦ-2	0,40
Твердый шлак воркутинского угля (крупнокусковой с включениями)	Воркутинская ТЭЦ-2	2,04
Золошлак воркутинского угля (50% т. шлака+50% золы)	Воркутинская ТЭЦ-2	1,0
Золошлак воркутинского угля (20% т. шлака+80% золы)	Воркутинская ТЭЦ-2	0,72

определению удельного времени работы до износа стенки трубы в среднем на 1 мм следует проводить по формуле:

$$t_L = t_1 \cdot k_L \cdot k_\beta, \qquad (5)$$

где k_L — коэффициент, учитывающий изменение абразивных свойств золошлаковых материалов с увеличением расстояния транспортирования; k_β — коэффициент, учитывающий влияние угла наклона трубопровода на износ труб.

Ориентировочные значения коэффициентов k_L и k_β для пульпопроводов можно определить по данным табл. 4 и 5. При необходимости более точного учета изменения абразивных свойств золошлаковых материалов на длинных трассах следует использовать рекомендации приложения 4.

Таблица 4

Значения коэффициента k_L

Вид транспортируемого материала	Дальность транспортирования L, км					
	0—5	5—10	10—15	15—20	20—25	25—30
Твердый шлак	1	1,45	1,8	2,0	2,1	2,2
Жидкий шлак / Зола	1	1,25	1,45	1,56	1,59	1,61
Золошлак (т. шлак+зола)	1	1,28	1,50	1,66	1,69	1,72
Золошлак (ж. шлак+зола)	1	1,25	1,45	1,56	1,59	1,61

Таблица 5

Значения коэффициента k_β

Направление потока	Угол наклона пульпопровода, β°								
	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90
Нисходящий	1—0,93	0,93—0,85	0,85—0,70	0,70—0,60	0,60—0,73	0,73—0,83	0,83—1	1—1,65	1,65—2,8
Восходящий	1—1,01	1,01	1,02	1,03	1,04—1,12	1,12—1,25	1,25—1,5	1,5—2,0	2,0—3,0

2.6. Для учета влияния угла наклона пульпопроводов на параметры неравномерного износа труб числовые значения $\varphi_{макс}$, определенные по табл. 2 или зависимости (3), умножаются на эмпирический коэффициент k_φ, определяемый по данным табл. 6.

Таблица 6

Значения коэффициента k_φ в зависимости от угла наклона пульпопровода

Угол наклона пульпопровода, β°	0—25	25—45	45—65	65—90
Коэффициент k_φ	1,0	1,5	1,75	0,0

2.7. Определенная по формуле (1) расчетная толщина стенки трубопровода уточняется с учетом коррозии материала труб:

$$\delta_{\Phi} = k_{\text{к}} \cdot \delta (1 + 0{,}1 \cdot \delta_{\text{мин}}), \qquad (6)$$

где $k_{\text{к}}$ — коэффициент, учитывающий химическую активность транспортируемой среды и режим работы пульпопровода; для проектируемых систем можно принять $k_{\text{к}} = 1{,}35$ — для труб, изготовленных из малоуглеродистых сталей, часто находящихся в резерве без консервации, и $k_{\text{к}} = 1$ — для труб, изготовленных из антикоррозионных материалов или работающих постоянно и находящихся в резерве в состоянии консервации, независимо от материала труб;

$\delta_{\text{ст.0}} = 10$ мм — условная стандартная толщина трубы, мм;

$\delta_{\text{мин}}$ — минимально допустимая толщина стенок трубопровода, определяется исходя из условий прочности согласно СНиП II-45-75 (для стальных труб, работающих с низконапорными грунтовыми насосами, обычно $\delta_{\text{мин}} = 2$—3 мм).

Значения δ_{Φ} округляются до ближайшей стандартной толщины (или кратного числа стандартной толщины) $\delta_{\Phi.\text{ст}}$.

2.8. Фактический срок службы пульпопровода определяется по зависимости:

$$T_{\Phi} = (\delta_{\Phi.\text{ст}} - \delta_{\text{мин}}) t_1. \qquad (7)$$

2.9. Время работы пульпопровода до очередного профилактического поворачивания определяется по зависимости:

$$T_{\text{п}} = \frac{T_{\Phi}}{n}. \qquad (8)$$

2.10. При наличии резервных линий фактический срок службы и время работы трубопроводов до очередного поворачивания следует определять соответственно по формулам:

$$T_{\Phi.\text{р}} = T_{\Phi} \cdot \frac{n_{\Sigma}}{n_{\text{р}}}, \qquad (9)$$

$$T_{\text{п.р}} = T_{\text{п}} \frac{n_{\Sigma}}{n_{\text{р}}}, \qquad (10)$$

где n_{Σ} — общее число трубопроводов; $n_{\text{р}}$ — число одновременно работающих трубопроводов.

2.11. В линии трубопроводных систем обычно включено значительное количество колен с различными углами поворота. Нарушение стационарности потока, увеличение скорости и углов соударения частиц со стенками, перераспределение полей концентрации пульпы на этих участках обусловливают развитие местного гидроабразивного изнашивания поверхности, интенсивность которого значительно превышает (особенно при транспортировании крупного шлака) интенсивность общего гидроабразивного изнашивания. Ориентировочный срок службы криволинейных участков труб может быть определен по формуле

$$T_{\text{кр}} = T_{\Phi} e^{1{,}9D/R}, \qquad (11)$$

где R — радиус поворота трубопровода, м ($R > 2D$).

2.12. Соединение отдельных участков металлических пульпопроводов следует выполнять с помощью сварки. При качественных сварных соединениях износ в швах увеличивается незначительно и может не учитываться при расчетах. При соединении отдельных участков пульпопровода с помощью фланцев износ труб у стыков в среднем на 50% больше, чем их общий износ.

2.13. При расчете величины гидроабразивного износа пульпопроводов, по которым транспортируется крупнокусковой шлак, не прошедший дробления, рекомендуется пользоваться материалами приложения 5. Примеры расчета гидроабразивного износа пульпопроводов приведены в приложении 6.

3. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ ПУЛЬПОПРОВОДОВ

3.1. Рекомендуется применять следующие основные методы борьбы с износом трубопроводов гидротранспортных систем:

а) выбор оптимальных режимов транспортирования пульпы с целью достижения максимальной долговечности эксплуатации оборудования:

б) выбор износостойких материалов;

в) усовершенствование конструкции фасонных частей трубопроводов и запорно-регулирующей арматуры с целью ликвидации мест повышенного износа;

г) контроль состояния трубопроводов и своевременное проведение ремонтно-профилактических работ.

3.2. Выбор рационального режима транспортирования пульпы, с целью достижения минимального износа оборудования, позволяет значительно снизить расходы на строительство и эксплуатацию трубопроводов гидротранспортных систем.

С целью обеспечения максимальной долговечности эксплуатации пульпопроводов необходимо выбирать минимальные допустимые скорости транспортирования предельно измельченных твердых частиц в соответствии с положениями «Рекомендаций по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта золошлаковых материалов» (П 61-77/ВНИИГ, Л., 1977).

В отдельных случаях при возможности осуществления регулирования скорости гидросмеси допускается периодическая работа системы с частично заиленным потоком, с последующим размывом шлаковых завалов в трубопроводе, в соответствии с рекомендациями ЮО ОРГРЭС.

При необходимости увеличения производительности гидросистемы целесообразно транспортировать пульпу высокой плотности при увеличенном диаметре трубопровода.

3.3. Выбор износостойких конструкционных материалов — одна из наиболее действенных мер повышения долговечности трубопроводов.

Коэффициенты относительной износостойкости различных конструкционных материалов, используемых отечественной промышленностью для изготовления (а также футерования) труб, приведены в табл. 7.

Таблица 7

Значения коэффициента износостойкости $k_и$

Конструкционный материал	Коэффициент износостойкости $k_и$	Конструкционный материал	Коэффициент износостойкости $k_и$
Сталь СТ-3 (эталон)	1,0	Серый чугун	
» 5	1,1—1,15	Сч 28—48	0,50
» 20	1,1—1,1	Сч 36—56	0,72
» 40	1,3	Хромомолибденовый	
» 40Х	1,35	чугун Ич 16МТ	3,30
» 25Г2	1,35	Хромистый чугун	
» 3Х13	1,3	ИчХ28Н2	4,00
» 30ХГС	1,5	Шлакоситалл	6,00
» 30ХГСА	1,5	Технический фарфор	6,5
» 4Х13	3,0	Базальт	6,5
» Х12	3,0—5,0	Керамика	4,0
» 55Л (литая)	1,08	Медный шлак	10,0
» 25Л	1,13	Фанера	1,0
» 35Л	1,76	Термостатированное	
» 70ХЛ	1,85	стекло	10,0
» 55Л (с термообработкой)	2,44	Полиэтилен В. Д.	0,45—0,7
» 5 (высокотемпературная газовая цементация)	2,00	Полиуретан на основе СКУ	3,0—8,0
» 20 (высокотемпературная газовая цементация)	2,00	Поливинилхлорид	0,8—0,9
		Стекловолокнит	2,9

3.4. Подробные данные о свойствах труб из наиболее перспективных износостойких материалов, а также данные о заводах-поставщиках и прейскурантных расценках приведены в приложении 7.

3.5. Перспективным методом увеличения долговечности оборудования являются конструктивные усовершенствования отдельных узлов, с целью предотвращения локального, концентрированного высвобождения энергии на относительно малой поверхности, приводящего к местному износу. Например, при проектировании и эксплуатации трубопроводов гидротранспортных систем золошлакоудаления необходимо соблюдение некоторых ограничений:

а) в соединениях отдельных узлов недопустимо наличие ступеней; рекомендуется наплавка внутренней поверхности концов металлических труб порошковыми сплавами — сормант и ФБХ-2, а также электродами Т-590 и Т-620; зона наплавки каждого конца трубы составляет $(0{,}8—0{,}85)D$, толщина наплавленного слоя 2—3 мм; наплавка должна иметь плавное сопряжение с внутренней поверхностью трубы;

б) по возможности следует избегать эксплуатации наклонных трубопроводов и в случае необходимости предусматривать наклон либо менее 20°, либо более 80°;

в) по возможности следует увеличивать радиус изгиба поворота колен — в случае высокой скорости транспортирования радиус должен быть равен (10—15)D, а при низкой скорости транспортирования — (5—10)D.

3.6. Особого исполнения требует запорно-регулирующая арматура, предназначенная для гидротранспортных систем. Вентили и клапаны должны полностью открываться и не должны иметь мертвых карманов, забивающихся твердым материалом. Обычно применяемые в системах водоснабжения вентили с суженными проходами создают высокоскоростной абразивный поток. Поэтому для гидротранспортных потоков, как правило, используют конические или шаровые клапаны и вентили, хорошо зарекомендовавшие себя высокой абразивной стойкостью.

3.7. Контроль состояния трубопроводов позволяет предупредить внезапный выход из строя и своевременно проводить профилактические работы на гидротранспортных системах. Рекомендуемые приборы, устройства и методики проведения контроля состояния пульпопроводов приведены в приложении 8.

Разработанные на основе анализа результаты контроля (непрерывного или оперативного) состояния труб, рекомендации по оптимальным срокам и углам их профилактического поворачивания и проведения планово-предупредительных работ, позволяют в 1,5—3 раза увеличить срок службы эксплуатируемых пульпопроводов и максимально использовать ресурс металла труб.

Проведение профилактических работ особое значение приобретает для систем золошлакоудаления, в которых наблюдается зарастание верхней и износ нижней части внутренней поверхности труб. Обоснованная регулярность поворачивания труб в таких условиях позволяет продлить срок их службы более чем на 10—12 лет.

3.8. Защита пульпопроводов, по которым транспортируется жидкий шлак, может быть осуществлена глубоким измельчением и окатыванием его частиц перед подачей в систему.

4. РАСЧЕТ СРОКА СЛУЖБЫ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ БАГЕРНЫХ НАСОСОВ

4.1. На современных ТЭС при совместном или раздельном гидротранспорте золы и шлака используются багерные насосы типа «Гр» и реже «ШНВ». В зависимости от дальности транспортирования сооружаются одна или две (три) багерные насосные станции, работающие последовательно, причем в каждой багерной насосной может устанавливаться один или два последовательно включенных багерных насоса. В соответствии с нормами технологического проектирования гидротранспортные си-

стемы проектируются с резервом насосного оборудования в 200% (на 1 рабочий насос устанавливается 1 ремонтный и 1 резервный). Резерв необходим из-за конструктивных недостатков насосов и интенсивного гидроабразивного износа.

4.2. Для прогнозирования износа в чисто практических целях предлагается следующая методика. Из всех факторов, влияющих на интенсивность протекания процесса, учитываются только факторы, которые характеризуют износостойкость материала и абразивность твердых частиц (крупность частиц, степень окатанности, относительную твердость контактирующих поверхностей, прочность конструкционного материала, из которого изготовлена рассматриваемая деталь). Остальные факторы (технологические и гидравлические параметры транспортирования) для однотипных грунтовых насосов (для насосов марки «Гр» в наших условиях) изменяются в незначительных пределах и поэтому могут не рассматриваться.

Определив опытным или расчетным путем долговечность отдельных деталей грунтового насоса рассматриваемого типа в определенных условиях, для установления пропускной способности данной детали в других конкретных условиях эксплуатации можно пользоваться формулой:

$$T_{и} = \frac{k_{и}}{k_{а}} \cdot \frac{k_{а.ан}}{k_{и.ан}} T_{н.ан}, \qquad (12)$$

где $T_{и}$ — срок службы детали насоса до полного износа, ч;

$k_{и}$ и $k_{и.ан}$ — коэффициенты относительной износостойкости материала, соответственно рассчитываемой и аналоговой детали; значения коэффициентов для конструкционных материалов, обычно используемых в отечественном насосостроении для изготовления деталей грунтовых насосов, приведены в табл. 7;

$k_{а}$ и $k_{а.ан}$ — коэффициенты относительной абразивности твердых частиц, перемещаемых соответственно по рассчитываемой и аналоговой детали; для золошлаковых материалов различных ТЭС значения коэффициентов могут быть определены по данным табл. 3;

$T_{н.ан}$ — срок службы аналоговой детали до полного износа, ч.

Ориентировочные данные о сроках службы отдельных элементов (деталей) багерных насосов, установленные на основании статистической обработки данных промышленных наблюдений, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Данные о сроках службы деталей багерных насосов

Наименование деталей	Продолжительность работы
Улитка	720—1200 ч
Броня	720—1200 ч
Рабочее колесо	360—720 ч
Патрубки	720—960 ч
Подшипники, вал	1—2 года
Полная замена (станина, электродвигатель)	15—20 лет

5. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ БАГЕРНЫХ НАСОСОВ

5.1. Мероприятия, способствующие снижению износа отдельных деталей насосов гидротранспортных систем, заключаются:

а) в совершенствовании проточной части грунтовых насосов;

б) в совершенствовании способов защиты всевозможных зазоров в грунтовых насосах от попадания в них твердых частиц;

в) в подборе наиболее износостойких материалов для изготовления деталей;

г) в повышении износоустойчивости путем футерования, а также упрочнения наплавкой проточной части и других деталей насосов;

д) в конструктивном усовершенствовании насосов, позволяющем ускорить смену предельно износившихся деталей;

е) в выборе рациональных режимов эксплуатации насосов;

ж) в разработке принципиально новых конструкций рабочих машин (например, поршневых насосов, питателей различных конструкций и т. д.) повышенной долговечности.

5.2. В стадии проектирования и эксплуатации систем золошлакоудаления наиболее действенными и практически реализуемыми из перечисленных мероприятий являются: выбор рациональных режимов эксплуатации насосов путем подбора машин с требуемыми номинальными характеристиками при максимальном КПД, своевременное обнаружение и устранение неполадок, восстановление (наплавкой твердыми сплавами) малообъемных деталей, подверженных местному износу, планирование проведения ремонтно-профилактических и восстановительных работ.

5.3. Для условий перекачивания шлаковой пульпы (с жидким или твердым шлаком) рекомендуется: при наличии в системе шлаковых дробилок применять багерные насосы марки «ГрК» или «ГрТ», а в случае отсутствия шлаковых дробилок — «ГрТ».

5.4. Окончательное решение по осуществлению какого-либо мероприятия по увеличению срока службы оборудования должно обосновываться технико-экономическими расчетами. Экономическая эффективность при увеличении долговечности эксплуатации оборудования рассчитывается по утвержденной ГКНТ СМ СССР методике (приложение 9).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ГИДРОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ГИДРОЗОЛОУДАЛЕНИЯ

1. Общие закономерности процесса

Под изнашиванием в технике понимается снижение работоспособности детали из-за линейного изменения геометрических размеров, вызываемого механическим воздействием.

В процессе износа гидротранспортного оборудования одновременно наблюдаются различные виды изнашивания. Однако для деталей, эксплуатируемых в среде абразивной гидросмеси, основной причиной выхода их из строя является механический, а точнее абразивный износ без заметного влияния сопутствующих видов износа.

Абразивным изнашиванием называется такой процесс, в котором выступы шероховатости или частицы одного тела при относительном перемещении внедряются в поверхностные слои сопряженного тела и образуют выбоины, бороздки, риски, царапины и т. д.

Механизм абразивного износа определяется закономерностями процессов пластической деформации и резания микрообъемов материала. Его частным случаем для оборудования гидротранспортных систем является так называемый гидроабразивный износ, когда интенсивность протекания процесса в значительной степени зависит от гидравлики потока и определяется не только физико-механическими свойствами абразива и изнашиваемой поверхности, но и условиями их динамического взаимодействия.

В общем случае при рассмотрении механизма гидроабразивного износа деталей следует учитывать возможность проявления следующих основных видов изнашивания: изнашивание материала путем среза или из-за пластической (в том числе многоцикловой) деформации, хрупкое или усталостное разрушение.

Расчеты показывают, что в нормальных условиях хрупкое или усталостное разрушение деталей гидротранспортных систем практически не встречается.

Таким образом, следует учитывать только два вида разрушения — срез микростружек металла и выбивание отдельных

составляющих микроструктуры при первичном или повторном пластическом деформировании.

По теории Биттера интенсивность развития процесса гидроабразивного изнашивания обусловлена массой и скоростью абразивных частиц, а также углом их направления относительно изнашиваемой поверхности. Потери объема поверхности при износе вследствие деформации определяются по уравнению:

$$\Delta_0 = \frac{1}{2} M \cdot \frac{(v_т \cdot \sin \alpha - v_к)^2}{\varepsilon}, \qquad (1\text{-}1)$$

где M — масса ударяющих абразивных частиц; $v_т$ — скорость твердой частицы; $v_к$ — максимальная скорость, при которой удар остается еще упругим; α — угол соударения частицы с поверхностью; ε — количество энергии, необходимое для удаления единицы объема разрушаемого материала.

Дж. Г. Нейльсон и А. Гилькрист, основываясь на теории Биттера, с добавлением некоторых экспериментальных значений характерных параметров процесса установили, что нормальная составляющая скорости обусловливает разрушение в результате деформации, а тангенциальная составляющая — разрушение в результате резания:

$$\Delta_0 = \frac{1}{2} M \frac{v^2_т \cdot \cos^2 \alpha - v^2_р}{\Phi} + \frac{1}{2} M \frac{(v_т \sin \alpha - v_k)^2}{\varepsilon} \qquad (1\text{-}2)$$

при $\alpha < \alpha_n$

и

$$\Delta_0 = \frac{1}{2} M \frac{v^2_т \cdot \cos^2 \alpha}{\Phi} + \frac{1}{2} M \frac{(v_т \cdot \sin \alpha - v_k)^2}{\varepsilon} \qquad (1\text{-}3)$$

при $\alpha > \alpha_n$,

где Φ — энергия, поглощаемая поверхностью при удалении единицы массы в результате среза; $v_р$ — остаточная тангенциальная скорость движения частицы; α_n — угол удара, при котором $v_р = 0$.

Анализ указанных работ позволяет заключить, что при рассмотрении процесса гидроабразивного изнашивания за основу теоретических построений обычно принимают кинетическую энергию и количество контактирующих частиц (факторы, определяющие величину и частоту возникших контактных напряжений в поверхностном слое материала) при определенном угле соударения гидросмеси с изнашиваемой поверхностью (фактор, определяющий вид разрушения поверхностных слоев).

Влияние факторов, определяющих износостойкость материала и абразивность твердых частиц, на износ оборудования расчетным путем учитывать затруднительно. Формулы, раскрывающие сущность влияния физико-механических свойств материалов на гидроабразивный износ, позволяют получить только качественные результаты. Доведение этих зависимостей до формы, позволяющей использование в расчетах основных справочных характеристик материалов, не удается. Износостойкость (как и

абразивность) можно рассматривать как самостоятельную динамическую характеристику и определять ее непосредственно опытным путем.

Эти факторы отнесены к первой группе. Во вторую группу сведены факторы, влияние которых на гидроабразивный износ можно рассчитывать посредством математических зависимостей, с точностью, приемлемой для практических целей (факторы, определяющие энергию абразивных частиц при их соударении с изнашиваемой поверхностью). Наконец, факторы, проявление которых носит случайный характер (определяющие количество твердых частиц, попадающих на поверхность износа), отнесены к третьей группе. Для их оценки целесообразно применение теории вероятности.

Использование перечисленных комплексных методов исследований (с учетом некоторых допущений, схематизирующих процесс взаимодействия частиц с поверхностью) позволило получить зависимость для определения интенсивности износа (кг/м²·с):

$$\Delta = f_1 \rho_т v^3_т S(1-S) d(\sin 2\alpha - 2\mu \sin^2 \alpha) + f_2 \rho_т v^3_т S(1-S) d \sin^2 \alpha, \quad (1\text{-}4)$$

где $\rho_т$ — плотность твердого материала; S — объемная консистенция пульпы; d — диаметр твердых частиц; μ — коэффициент трения абразива при скольжении его по поверхности в воде; f_1 и f_2 — коэффициенты, учитывающие прочностные свойства изнашиваемого материала и абразивные свойства твердых частиц, определяемые экспериментальным путем при износе материала соответственно скользящей струей и вертикально вниз направленной гидросмесью.

Зависимость (1-4) можно разложить на две независимые друг от друга части: учитывающую интенсивность гидроабразивного износа материала, вызванную скользящим потоком, и аналогично потоком, направленным перпендикулярно к изнашиваемой поверхности.

Расчеты показывают, что при $\alpha \leqslant 25°$ для сталей, обычно применяемых в промышленности для изготовления гидротранспортного оборудования, без ущерба точности можно записать:

$$\Delta = f_1 \rho_т v^3_т S(1-S) d \sin 2\alpha. \quad (1\text{-}5)$$

2. Гидроабразивный износ трубопроводов

Непосредственными измерениями, проведенными с помощью различных методов исследования, установлено, что среднестатический угол встречи частиц со стенками труб изменяется в небольшом диапазоне (6—12° при обычно принятых условиях транспортирования). Это позволяет расчет гидроабразивного износа нижней стенки трубы вести по упрощенной зависимости:

$$\Delta = k_а \cdot k_и \cdot \rho_т v^3_т \cdot S(1-S) d, \quad (1\text{-}6)$$

где $k_а = f_1 \sin 2\alpha_{ср} \approx f_1 (\sin 2\alpha_{ср} - 2\mu \sin^2 \alpha_{ср} + \frac{f_2}{f_1} \sin^2 \alpha_{ср})$ — коэффициент

относительной абразивности твердых частиц, определяемый экспериментально при износе малоуглеродистой стали скользящим потоком гидросмеси; $k_и$ — коэффициент относительной износостойкости, учитывающий изменение прочности используемого конструкционного материала по сравнению с эталонным (с малоуглеродистой сталью).

Параметры, входящие в формулу (1-6), определялись на основе анализа результатов исследований кинематической структуры потоков гидросмеси в нижней части периметра трубы с центральным углом, равным углу максимального износа, для трубопроводов, транспортирующих взвесенесущие потоки с частицами мелкой и средней крупности, с обычно принимаемыми в практике скоростями ($v_{кр} < v_{ср} < 2v_{кр}$). Одновременно учитывались результаты промышленных наблюдений за износом гидротранспортных трубопроводов. Оценка этих параметров показывает, что интенсивность гидроабразивного износа трубы вдоль полной окружности (кг/м²·с), с учетом неравномерности изнашивания стенок по периметру, может быть вычислена по зависимости:

$$\Delta_{расч} = \Delta_{ан}\left(\frac{v_{ср}}{v_{ан}}\right)^{q_1} \cdot \left(\frac{S_{ср}}{S_{ан}}\right)^{q_2} \cdot \left(\frac{d_{ср}}{d_{ан}}\right)^{q_3} \cdot \left(\frac{\rho_т}{\rho_{ан}}\right)^{q_4} \cdot \left(\frac{D}{D_{ан}}\right)^{q_5} \cdot \frac{k_а \cdot k_{и.ан}}{k_{а.ан}\, k_и}, \quad (1\text{-}7)$$

где $\Delta_{ан}$, $v_{ан}$, $S_{ан}$, $d_{ан}$, $\rho_{ан}$, $D_{ан}$ — значения интенсивности износа, скорости, консистенции гидросмеси, крупности и плотности абразивных частиц, диаметра трубопровода, принятого условно эталонным с известными указанными параметрами;

q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 — показатели степени; для приведенных условий $q_1 = 2{,}5$; $q_2 = 0{,}65$; $q_3 = 0{,}9$; $q_4 = 1$; $q_5 = 0{,}31$.

Удовлетворительное совпадение расчетных значений $\Delta_{расч}$ с результатами экспериментальных исследований (рис. 1-1), проведенных различными авторами, позволяет рекомендовать вести расчет параметров гидроабразивного износа проектируемых и эксплуатируемых трубопроводов гидротранспортных систем по зависимости (1-7) (из множества экспериментальных результатов, для сравнения выбраны лишь данные гидроабразивного износа труб, транспортирующих мелко- и среднезернистые частицы абразива).

Технический ресурс пульпопровода (год), т. е. чистое время работы за весь срок его службы, определяется по формуле

$$T_р = \frac{\delta \cdot \rho_{тр}}{31{,}5 \cdot 10^6 \Delta_{расч}}, \quad (1\text{-}8)$$

где $\delta = \delta_{нач} - \delta_{мин}$ — допустимый износ стенки трубы по толщине, м; $\delta_{нач}$ — начальная толщина стенок трубы, м; $\delta_{мин}$ — минимально допустимая толщина стенок трубы, м; $\rho_{тр}$ — плотность материала трубы, кг/м³.

Срок службы трубопровода (календарная продолжительность эксплуатации до разрушения или другого предельного состояния) определяется по формуле:

$$T = T_{\text{р}} + \Sigma t_{\text{пр}}, \qquad (1\text{-}9)$$

где $\Sigma t_{\text{пр}}$ — суммарное время простоев трубопровода за весь срок его эксплуатации, год.

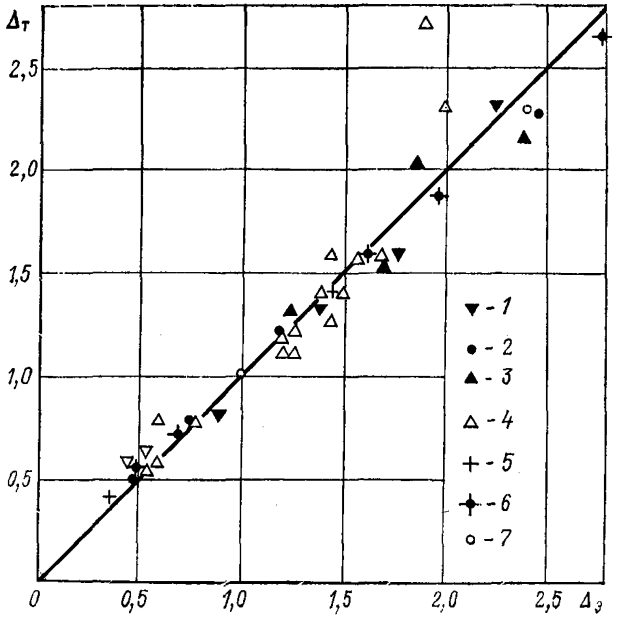


Рис. 1-1. Сопоставление результатов расчетов гидроабразивного износа труб по формуле (1-7) с данными экспериментальных исследований и промышленных наблюдений

Эксперименты: *1* — С. П. Турчанинова; *2* — В. С. Подкорытовой; *3* — Н. Д. Залмаева; *4* — В. Н. Покровской; *5* — В. В. Ляшевича; *6* — Н. И. Аксенова; *7* — Л. Д. Джексона.

Если учесть, что в системах гидрозолоудаления приняты приблизительно одинаковые условия эксплуатации, т. е. $\Sigma t_{\text{пр}} = \text{const}$, с учетом формулы (1-7) можно записать:

$$t_1 = \frac{T_{\text{ан}}}{\delta_{\text{и.ан}}} \cdot \frac{n\psi}{n_{\text{ан}}\psi_{\text{ан}}} \cdot \frac{k_{\text{а.ан}}\, k_{\text{и}}}{k_{\text{а}} k_{\text{и.ан}}} \cdot \frac{\rho_{\text{ан}}}{\rho_{\text{т}}} \left(\frac{v_{\text{ан}}}{v_{\text{ср}}}\right)^{2,5} \cdot \left(\frac{S_{\text{ан}}}{S_{\text{ср}}}\right)^{0,65} \cdot \left(\frac{d_{\text{ан}}}{d_{\text{ср}}}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{D_{\text{ан}}}{D}\right)^{0,3} \qquad (1\text{-}10)$$

где t_1 — удельный срок службы трубопровода до среднего износа толщины стенок труб на 1 мм, год/мм;

$T_{\text{ан}}$ — время работы пульпопровода-аналога до предельного износа (год), определяется по результатам статистической обработки данных натурных наблюдений эксплуатируемых пульпопроводов (табл. 1);

$k_{\text{а.ан}}$, $k_{\text{а}}$ — коэффициенты относительной абразивности соответственно эталонного и транспортируемого материала, определяемые экспериментально;

$k_{\text{и.ан}}$, $k_{\text{и}}$ — коэффициенты относительной износостойкости соответственно эталонного и используемого конструкционного материала;

$n_{ан}$, n — число рабочих положений соответственно аналогового и рассчитываемого пульпопровода;

$\psi_{ан}$, ψ — коэффициенты неравномерности износа по окружности соответственно аналогового и рассчитываемого пульпровода;

$\delta_{и.ан} = \delta_{нач} - \delta_{мин}$ — фактический износ стенок трубопровода-аналога по толщине, мм;

$\delta_{нач}$ — начальная толщина стенок трубопровода-аналога, мм;

$\delta_{мин}$ — минимально допустимая толщина стенок трубопровода-аналога;

$\rho_{ан}$, $v_{ан}$, $S_{ан}$, $d_{ан}$, $D_{ан}$ — соответственно плотность твердого, скорость транспортирования и консистенция пульпы, крупность частиц и диаметр пульпопровода-аналога;

$\rho_т$, $v_{ср}$, $S_{ср}$, $d_{ср}$, D — соответственно плотность твердого, средняя скорость транспортирования и консистенция пульпы, крупность частиц и диаметр рассчитываемого пульпопровода.

Приняв

$$K_{ан} = \frac{T_{ан}}{\delta_{и.ан} \cdot n_{ан}\psi_{ан}} \cdot \frac{\rho_{ан}}{\rho_т} \cdot v_{ан}^{2,5} \cdot S_{ан}^{0,65} \cdot D_{ан}^{0,3} \cdot \frac{k_{а.ан}}{k_{и.ан}} \left(\frac{d_{ан}}{d_{ср}}\right)^{0,9} \qquad (1\text{-}11)$$

и учитывая, что при экспериментальном определении значений $k_а$ абразивность золошлакового материала устанавливается в его естественном состоянии, с учетом реальных значений $d_{ср}$ и $\rho_т$, можно при ориентировочных расчетах принять $\frac{\rho_{ан}}{\rho_т} \approx 1$, $\left(\frac{d_{ан}}{d_{ср}}\right) \approx 1$, а также $\delta_{и.ан} = 10$ мм, $n_{ан}\psi_{ан} = 2{,}5$, получаем:

$$K_{ан} = \frac{T_{ан}}{25} \cdot \frac{k_{а.ан}}{k_{и.ан}} \cdot v_{ан}^{2,5} \cdot S^{0,65} \cdot D^{0,3}, \qquad (1\text{-}12)$$

тогда:

$$T_1 = \frac{K_{ан} n \psi \cdot k_и}{k_а v_{ср}^{2,5} \cdot S_{ср}^{0,65} \cdot D^{0,3}}, \qquad (1\text{-}13)$$

где $K_{ан}$ — коэффициент, учитывающий фактический срок службы трубопровода-аналога до износа его стенок на 1 мм при определенных условиях эксплуатации.

Значения $K_{ан}$, определенные по результатам статистической обработки данных промышленных наблюдений за износом эксплуатируемых пульпопроводов (материал труб — малоуглеродистая сталь), сведены в табл. 1.

3. Влияние параметров транспортируемого потока на интенсивность гидроабразивного изнашивания

Влияние скорости твердых частиц на интенсивность изнашивания

Полученные аналитическим путем зависимости показывают, что интенсивность гидроабразивного изнашивания в общем случае может быть выражена как функция скорости:

$$\Delta = A_v \cdot v_т^c, \qquad (1\text{-}14)$$

где A_v — коэффициент пропорциональности, определяемый при постоянных значениях всех параметров, влияющих на интенсивность протекания процесса, кроме скорости; $v_т$ — скорость перемещения твердых частиц; c — показа-

тель степени, равный 2—3, в зависимости от принятых условий протекания процесса при теоретическом анализе (2 — при учете износа единичными частицами, 3 — при учете износа пульпой со взвешенными частицами).

На рис. 1-2 приведены результаты экспериментальных исследований по определению влияния скорости твердых частиц на интенсивность изнашивания материала, полученные на струеударной установке.

На рис. 1-3 дается зависимость массового износа образца от скорости движения частиц при проведении испытаний скользя-

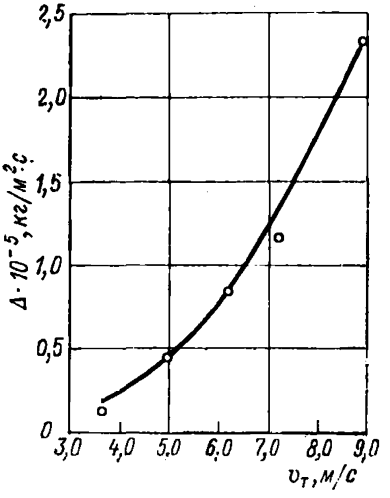


Рис. 1-2. Зависимость интенсивности износа от скорости соударения твердых частиц о поверхность.

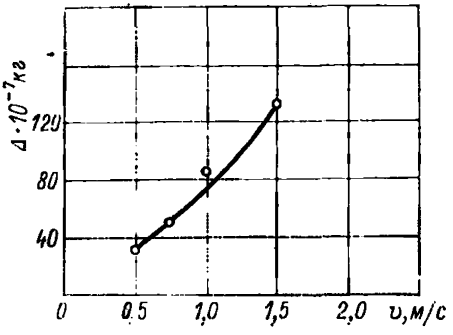


Рис. 1-3. Зависимость весового износа образцов от скорости относительного перемещения твердых частиц.

щим потоком гидросмеси (на установке с образцами, закрепленными на вращающемся барабане под углами направления относительно потока 3—12°).

Анализ экспериментальных материалов показывает, что при незначительном изменении диапазона скоростей относительного перемещения частиц и образцов, когда не изменяется качественная картина их контактирования с поверхностью, износ материалов увеличивается с увеличением скорости в степени, приблизительно равной 3.

В результате математической обработки большой серии опытов по износу металлической пластинки потоком пульпы французским инженером Ильгазом составлена следующая формула:

$$J = k \cdot \omega^{0,7} \cdot S_{м}^{0,7} \cdot V_0^{2,7}, \qquad (1\text{-}15)$$

где J — объемный износ образца, см³; k — коэффициент, определяемый опытным путем: ω — площадь насадки струеударной установки, см²; $S_м$ — массовая консистенция пульпы, г/л; V_0 — скорость вылета струи из насадки, м/с.

Особый интерес представляет сравнение данных расчетов по аналитическим зависимостям с результатами экспериментальных исследований.

Экспериментальные значения показателей степени при $v_т$, по данным ряда авторов, определявших влияние скорости частиц на интенсивность износа за определенное время при натекании потока гидросмеси на поверхность, колеблются в пределах 2,5—3,2 (при преобладании механического износа).

Некоторый разброс результатов экспериментальных исследований можно объяснить изобилием факторов, влияющих на протекание процесса гидроабразивного изнашивания, неизбежной погрешностью при проведении испытаний на установках различной конструкции, а также тем, что часть авторов в своих опытах устанавливали связь между износом и скоростью транспортирования пульпы, а не твердых частиц.

Зависимость интенсивности изнашивания от угла натекания твердых частиц на поверхность

По мнению многих исследователей, гидроабразивный износ деталей в значительной степени зависит от угла атаки их абразивными частицами. Формула (1-4) показывает, что зависимость интенсивности гидроабразивного изнашивания от угла атаки выражается функцией:

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta_{90} = A_0(\sin 2\alpha - 2\mu \sin^2 \alpha) + A_{90} \cdot \sin^2 \alpha, \qquad (1\text{-}16)$$

где Δ_0 — интенсивность износа, вызванная тангенциальной составляющей силы косого удара;

Δ_{90} — интенсивность износа, вызванная вертикальной составляющей силы удара;

A_0 и A_{90} — коэффициенты пропорциональности, когда ни один из факторов, влияющих на гидроабразивный износ, за исключением угла атаки, не изменяется.

Справедливость функциональной зависимости (1-16) подтверждена опытными данными, полученными на струеударной установке.

На рис. 1-4 и 1-5 показана зависимость массового износа образцов от угла их установки относительно скользящего потока гидросмеси при $v_т = 1{,}5$ м/с и $S_{ср} = 0{,}3$.

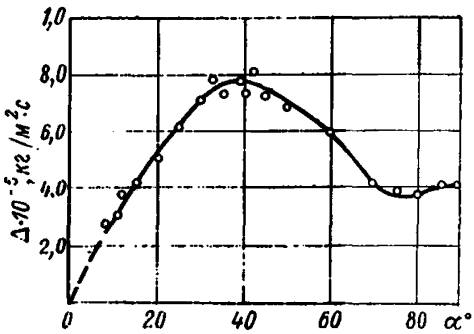


Рис. 1-4. Зависимость интенсивности износа от угла атаки поверхности твердыми частицами.

Расхождения между экспериментальными и аналитическими значениями величин износа незначительны.

Широко известны исследования, выполненные Ильгазом. Им была установлена зависимость интенсивности износа от угла

встречи струй пульпы с образцом. Экспериментально было получено, что при угле встречи $\alpha = 30°$ интенсивность износа стальных образцов достигает максимального значения. В интервале $\alpha = 30 - 90°$ зависимость интенсивности износа от угла встречи выражается формулой

$$J_\alpha = \frac{J_0}{\sin \alpha}, \qquad (1\text{-}17)$$

где J_0 — интенсивность износа образца струй, нормальной к его поверхности.

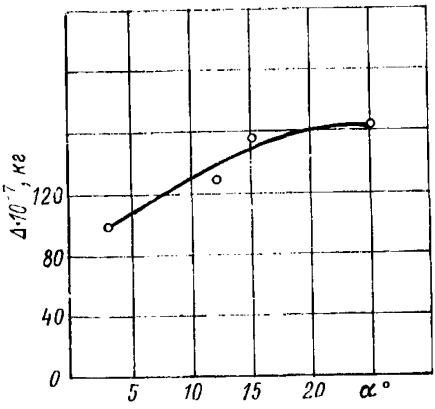


Рис. 1-5. Зависимость весового износа образцов от угла их установки относительно скользящего потока гидросмеси.

Сопоставление значений интенсивности износа, вычисленных по зависимости (1-16), с результатами экспериментальных исследований разных авторов позволяет утверждать о правомочности доводов, объясняющих физическую сущность процесса гидроабразивного изнашивания в зависимости от воздействия абразивных частиц, направленных под различными углами относительно поверхности материала.

Влияние консистенции пульпы на интенсивность гидроабразивного изнашивания

Анализ результатов исследований по изучению влияния изменения объемной консистенции пульпы на интенсивность протекания процесса изнашивания показывает, что в любых условиях проведения эксперимента с увеличением консистенции вначале пропорционально увеличивается и весовая убыль испытываемых образцов, а затем износ практически остается постоянным. При минимальных скоростях относительного перемещения частиц в скользящих потоках с перенасыщенными слоями абразива намечается некоторое уменьшение интенсивности изнашивания. Это объясняется тем, что в таких условиях у поверхности износа образуется неподвижный слой заиления, предотвращающий непосредственный контакт движущихся частиц с ограничивающими стенками.

Определенный интерес представляет сравнение данных расчетных зависимостей гидроабразивного износа при изменении консистенции, выведенных разными исследователями.

Сопоставление показывает (табл. 1-1), что характер изменения износа поверхности с изменением консистенции гидросмеси описывается сходными зависимостями (за исключением формулы В. Б. Дульнева, которая предназначена для расчета потоков очень низкой консистенции). При концентрациях твердого $S_{ср} <$

Таблица 1-1

Характер изменения износа поверхности в зависимости от консистенции пульпы

Автор	Формула для расчета износа	Относительный износ $\Delta/\Delta_{S=0,1}$ при консистенции гидросмеси									
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
П. В. Васильев	$\Delta = F(S^{2/3})$	0,65	1,00	1,30	1,57	1,80	2,10	2,30	2,50	2,70	2,90
В. Б. Дульнев	$\Delta = F(S)$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
В. В. Ляшевич	$\Delta = F[S(1-S)^2]$	0,54	1,00	1,48	1,63	1,75	1,84	1,86	1,80	1,72	1,67
М. Н. Геленидзе	$\Delta = F(S \cdot e^{-4S})$	0,61	1,00	1,24	1,34	1,40	1,37	1,31	1,22	1,15	1,02
Т. Ш. Гочиташвили	$\Delta = [S(1-S)]$	0,53	1,00	1,41	1,77	2,07	2,32	2,54	2,66	2,75	2,77

Примечание. При составлении таблицы использованы теоретические зависимости, а за единичный износ принят износ поверхности при $S=0,1$.

$<0,15—0,20$ износ поверхности находится в линейной зависимости от изменений консистенции; по мере увеличения консистенции гидросмеси эта зависимость переходит в степенную, и в дальнейшем наступает такое насыщение смеси твердыми частицами (при $S_{ср}>0,25—0,30$), когда повышение консистенции больше не вызывает увеличения износа.

Влияние крупности твердых частиц на интенсивность гидроабразивного изнашивания

Анализ результатов экспериментальных исследований по изучению влияния крупности твердых частиц на интенсивность гидроабразивного изнашивания показывает, что повышение размеров очень мелких ($<0,05—0,08$ мм) частиц ведет к медленному возрастанию износа. В дальнейшем увеличение крупности абразивного материала до 2,5—3,0 мм вызывает приблизительно пропорциональное увеличение интенсивности износа. Повышение крупности выше указанного предела приводит к снижению интенсивности возрастания процесса.

Как известно, золошлаковые материалы (за исключением жидкого шлака) можно отнести к абразивам мелкой и средней крупности, увеличение линейных размеров которых вызывает пропорциональное увеличение интенсивности изнашивания конструкционных материалов.

Доказательство правомочности линейной зависимости износа материала от крупности частиц в области тонкодисперсных, а также крупнокусковых материалов не представляется возможным. Ограничение верхнего предела крупности частиц устанавливается условием перехода одного вида разрушения в другой (например, многоциклового вида разрушения к разрушению соударением единичных частиц). Тонкодисперсными же частицами условно принято считать частицы, распределение которых по глубине взвесенесущего потока равномерное практически в любом, в том числе и в критическом режиме транспортирования.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗОЛЫ И ШЛАКА

1. Гранулометрический состав золы и шлака на ТЭС

Гранулометрический состав золы и шлака данного твердого топлива, поступающих в систему каналов гидрозолоудаления ТЭС, зависит от следующих факторов:

конструкции топок котлоагрегатов (с жидким или твердым шлакоудалением);

эксплуатационных условий работы котлоагрегата (паровые нагрузки, равномерность и температура горения топлива в камере сжигания, сжигание топлива совместно с мазутом или природным газом и пр.);

системы пылеприготовления и подачи угольной пыли для сжигания (тип, подача, производительность, эксплуатационное состояние и количество одновременно работающих пылеугольных мельниц; наличие и исправность сепаратора, а также величина открытия его створок; температура сушильного агента);

типа мельниц (барабанно-шаровые, молотковые, среднеходовые, валковые и мелющие вентиляторы) и их эксплуатационного состояния (износ бил и корпуса в молотковых, изменение массы загруженных шаров в барабанно-шаровых мельницах и т. д.);

устройств, с помощью которых шлак подается в систему ГЗУ (шнеки, транспортеры) из холодных воронок или шлакосмывных шахт, а также конструкции шлакодробилок.

Кроме того, гранулометрический состав золы определяется:

конструкцией золоулавливающих устройств (при сухом золоулавливании плохо улавливаются фракции меньше 0,005 мм, электрофильтры неудовлетворительно работают с золой, обладающей большим электрическим сопротивлением, мокрые золоуловители — с золой, содержащей в своем составе большое количество химических компонентов, способствующих образованию нерастворимых соединений);

эксплуатационным состоянием аппаратов золоулавливания (износ циклонных элементов и жалюзийных решеток в батарейных циклонах и жалюзийных уловителях, повреждение корпуса и системы подачи воды в центробежных скрубберах, неисправности механизмов встряхивания или попадание мазута на электроды в электрофильтрах); кроме того, состав золы на электрофильтрах зависит от работы обслуживающего персонала.

Обобщая экспериментальные данные по гранулометрическому составу золы тепловых электростанций, можно сделать следующие выводы (табл. 2-1).

Состав золы зависит от тонкости помола топлива и, как следствие этого, механизма пылеприготовления. При измельчении топлива барабанно-шаровыми и среднеходовыми валковыми мельницами зола в целом является более тонкой, чем зола при измельчении топлива молотковыми мельницами и мелющими вентиляторами;

зола, уловленная мокрыми золоуловителями, при усреднении является более тонкой, чем уловленная сухими золоуловителями; минимальная крупность частиц золы, поступающей в систему каналов ГЗУ, приблизительно равна $d = 0{,}003$—$0{,}007$ мм (в среднем 0,005 мм); зола торфа является наиболее крупной, а зола эстонских сланцев и ангренских углей наиболее мелкой.

На работающих ТЭС в зависимости от конструкции котлоагрегата в топках образуются две разновидности шлака — твердый и жидкий, которые даже при сжигании одного топлива обладают крайне неодинаковыми свойствами.

При твердом шлакоудалении в зависимости от рода твердого топлива, режима работы котлоагрегата и его конструкции в топках может образовываться мелкий по составу шлак торфа и сланцев или достаточно крупный, но обладающий крайне малой прочностью шлак некоторых угольных топлив. К последней разновидности шлака угольных топлив относятся тугоплавкие шлаки, имеющие температуру размягчения $t_г > 1350°$ С — экибастузского, карагандинского, райчихинского, лермонтовского, бикинского, смеси ткибульского и ткварчельского, азейского, черемховского и некоторых других углей. Для разрушения в топках котлов крупных включений этой разновидности твердого шлака обычно достаточно шлакоудаляющих устройств (шнеки, ленточные транспортеры), которые перемещают шлак из холодных воронок к сбросу в смывной канал. Отмеченные особенности в свойствах шлака позволяют отказаться от его дробления, и поэтому такой шлак сбрасывается в смывные каналы ГЗУ практически в том виде, который он имел в топках.

Твердый шлак угольных топлив — среднеплавких $t_г = 1350 \div 1250°$ С, а также легкоплавких $t_г = 1250°$ С (шлак гусиноозерского, нерюнгринского, кузнецкого некоторых месторождений, смеси черновского и харанорского, киргизского, челябинского, ангренского, львовско-волынского и некоторых других углей), а иногда даже и жидкий шлак при периодическом сбросе и небольшом выходе его с каждого котлоагрегата часто не измельчают перед сбросом в смывной канал. В этом случае с целью исключения попадания в каналы ГЗУ крупных включений шлака, а также обломков кирпича и других предметов на ТЭС перед сбросом установлены решетки с размером ячеек $8 \times 8 - 10 \times 10$ см.

В других случаях эксплуатации ТЭС среднеплавкий и легкоплавкий шлак угольных топлив, а также жидкий шлак измельчают дробилками.

Таблица 2-1

Гранулометрический состав и агрегатная плотность золы и шлака, получаемых в золоулавливающих устройствах и шлаковых шахтах котлоагрегатов на тепловой электростанции

Котлоагрегат	Золоуловители и разновидность шлака	ρ_a, г/см³	Процентное содержание фракций, мм									
			>10	10÷5	5÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,125	0,125÷0,063	0,063÷0,04	<0,04
Донецкий уголь — Старобешевская ГРЭС												
ТПП	МЗ	2,47				2,5	1,1	3,8	6,9	15,9	10,1	59,7
	(шлак*)	2,59	16,6	19,9	45,4	15,8	1,5	0,6	0,1	0,1		
Донецкий уголь — Ярославская ТЭЦ-2												
БКЗ	МЗ	—						0,3	3,8	26,0	22,8	47,1
ТП	МЗс ТВ						0,5	0,7	6,9	20,6	20,9	50,4
Донецкий уголь (марка «Г» и «ГР») — Углегорская ГРЭС												
ТПП	ОК	—						19,5	20,2	20,3	20,5	19,5
	+ 1пГЭ	2,44					0,4	0,9	7,7	8,7	25,9	56,4
	+ 2пГЭ	2,48						0,7	8,6	9,2	24,9	56,6
	+ 3пГЭ	2,37						0,5	9,0	10,7	21,1	58,7
Донецкий уголь (марка «Г» и «ГР») — Запорожская ГРЭС												
ТПП	ОК	—					1,6	3,2	22,5	25,7	33,3	13,7
	+ 1пГЭ	—					1,4	2,3	15,4	14,5	21,0	45,4
	+ 2пГЭ	2,51						0,5	4,1	4,1	37,7	53,6
	+ 3пГЭ	2,56						0,8	10,7	9,1	41,5	37,9
	(шлак)	—	41,3	26,6	26,1	5,2	0,4	0,2	0,1	0,1		
Донецкий уголь (марка «Д» и «Г») — Мироновская ГРЭС												
	БЦ	2,44						1,0	4,0	12,0	25,0	58,0
	(шлак)	—	25,3	17,3	40,3	14,7	1,3	0,8	0,3			
Донецкий (промпродукт шлам) и др. угли — Кураховская ГРЭС												
ТП	ФК	2,11										
	+ 1пГЭ	—					0,1	2,6	9,5	13,6	22,6	51,6
	+ 2пГЭ	2,14						27	8,0	11,7	20,8	56,7
	+ 3пГЭ	2,24							1,5	4,4	12,4	81,7
	шлак*	2,00		23,4	20,3	10,5	6,1	12,6	15,8	6,6	3,1	1,6
ТП	шлак*	2,09		9,2	14,7	9,1	5,8	13,7	19,7	13,0	9,3	5,5
Донецкий уголь — ТЭЦ Ижорского завода												
„Бабкок-Вилькок"	БЦ	2,27			4,0	0,5	0,4	1,4	3,6	10,3	18,6	61,2
	+ 1пГЭ	2,26						0,5	1,6	6,0	9,5	82,4
	шлак	2,10	6,7	7,1	7,7	5,2	5,0	17,1	23,8	19,8	4,4	3,2
Донецкий уголь — Ладыженская ГРЭС												
ТП	ФК	—						3,9	15,8	34,4	21,6	24,3
	+ 1пГЭ	3,02						1,5	5,9	19,9	20,2	52,5
	+ 2пГЭ	2,54						1,0	2,7	10,0	14,5	71,8
	+ 3пГЭ	2,61								2,5	3,6	93,9
	(шлак*)	2,60	18,6	17,2	55,5	8,3	0,2	0,1	0,1			

Продолжение табл. 2-1

Котлоагрегат	Золоуловители и разновидность шлака	$\rho_д$, г/см³	Процентное содержание фракций мм									
			>10	10÷5	5÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,125	0,125÷0,063	0,063÷0,04	<0,04
Донецкий уголь — Новочеркасская ГРЭС												
ТПП	1пГЭ	—				0,3	0,9	4,7	12,6	23,0	31,4	27,1
	+ 2пГЭ	2,35						1,7	8,8	26,9	26,3	36,3
	+ 3пГЭ	—						0,7	8,0	19,1	28,2	44,0
	+ 4пГЭ							2,8	3,4	14,8	20,0	59,0
	шлак*	2,65	26,2	39,3	23,1	10,0	1,2	0,1	0,1			
	МЗ								5,0	13,0	23,0	59,0
Смесь донецкого и кузнецкого углей — Черепетская ГРЭС												
	3пВЭ	2,17					0,3	1,3	4,4	1,0	34,7	58,3
	(шлак*)	2,62	18,0	7,7	40,0	29,6	3,2	1,1	0,1	0,1	0,2	
Кузнецкий уголь — Ленинградская ТЭЦ-14												
ТП	1пГЭ	2,20							1,8	9,1	16,0	73,1
	+ 2пГЭ	2,19										
	+ 3пГЭ	2,21				0,3	0,3	0,8	1,8	10,5	17,5	68,8
	(шлак*)	2,46	39,4	18,1	31,8	9,0	0,7	0,5	0,3	0,2		
Кузнецкий уголь — Ленинградская ТЭЦ-17												
БКЗ	ЖУ	2,33										
	+ 1пГЭ	2,18					0,3	1,2	3,8	14,9	21,4	58,4
	+ 2пГЭ	2,18					0,3	2,0	10,0	12,4	10,0	65,3
	+ 3пГЭ	2,12						1,5	6,9	15,0	8,4	68,2
	+ 4пГЭ	2,12					0,4	0,4	4,8	14,0	10,7	69,7

	(шлак*)	2,50	12,4	38,3	44,0	5,0	0,2	0,1				
Кузнецкий уголь — Новосибирская ТЭЦ-3 (I очередь)												
	БЦ	2,14						0,2	12,8	20,0	13,0	54,0
	шлак	—	65,1	17,7	7,7	1,5	0,9	1,3	5,8			
Кузнецкий уголь — Барабинская ГРЭС												
ТП	БЦ	2,01	—	—	—	—	—	0,5	3	10,5	26	60
ТП	БЦ	—	—	—	—	—	—	0,5	3	14,5	38,5	43,5
	шлак	—	15	3,4	7	6,7	4,7	12,6	19,7	14,5	11,4	5,0
ТП	БЦ	—	—	—	—	—	—	1,7	7,5	19,5	37,7	33,6
	шнеки	—	13,3	10,4	16,1	7,1	3,7	7,8	15	12,5	9,5	4,6
ТП	БЦ	—	—	—	—	—	—	1,5	7,7	15,7	30	45,1
	шлак**	2,26	19,3	5,9	4,2	3	2,9	14,1	23,7	14,9	8,4	3,6
ТП	БЦ	—	—	—	—	—	—	2	8,5	15,5	26	48
	шлак**	—	15,8	8,7	7,7	5,4	3,5	9,7	18,1	15,2	11,7	4,2
Кузнецкий, интинский, арктический угли — ТЭЦ Архангельского ЦБК (котлоагрегат С со слоевым сжиганием топлива — древесной коры)												
С	МПВТИ	—	—	—	9	6,5	2,5	9,5	6,5	9,5	26,5	30
	шлак	—	9,5	20,3	30	19,3	6,7	5,2	2,7	1,7	2,4	2,2
БКЗ	МЗ с ТВ	—	—	—	—	—	—	3,7	6,9	10,5	19,9	59
	шлак*		13	16,7	14,7	7,5	4,1	15,8	17,6	6,3	2,7	1,6
БКЗ	МЗ с ТВ	—	—	—	—	—	—	1,5	8,7	12,8	20	57
	шлак*		—	15	20,8	16,6	7,3	9,5	10,9	6,7	7,2	6
Экибастузский уголь — Ермаковская ГРЭС												
	ОК	2,06						1,4	26,2	52,4	14,6	5,4
	+											

Продолжение табл. 2-1

Котлоагрегат	Золоуловители и разновидность шлака	ρ_a, г/см³	Процентное содержание фракций, мм									
			>10	10÷5	5÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,125	0,125÷0,063	0,063÷0.04	<0,04
	1пГЭ	2,18						0,4	3,3	13,7	13,1	69,5
	+ 2пГЭ	2,06						0,5	2,0	15,0	21,5	61,0
	+ 3пГЭ	2,13						0,2	3,0	15,0	14,9	66,9
	+ 4пГЭ	2,17						0,6	5,5	15,6	11,1	67,2
	шлак	2,17			4,8	4,6	5,1	20,8	32,4	26,2	5,8	0,3
	Экибастузский уголь — Троицкая ГРЭС											
	ЦС	1,94						1,4	15,9	46,5	22,8	13,4
	шлак	2,10		5,6	9,5	8,3	5,5	17,0	24,2	19,0	6,6	4,3
ПК	КК	—					3,0	16,3	32,0	32,6	10,8	5,3
	+ ФК	—					1,8	13,3	30,9	34,4	12,6	7,0
	+ БЦ	1,85					0,5	5,3	19,6	38,2	20,8	15,6
	+ 1пГЭ	1,86					0,2	2,8	11,1	30,9	25,2	29,8
	+ 2пГЭ	1,88						1,8	8,1	22,7	24,7	42,7
	+ 3пГЭ	1,95					0,2	1,0	4,6	17,4	24,5	52,3
	шлак	2,26	17,1	6,5	12,8	6,0	3,3	12,3	18,6	11,1	5,4	6,9
	Экибастузский уголь — Омская ТЭЦ-4											
БКЗ	2ПГЭ	1,89					0,7	6,4	15,8	26,1	25,9	25,1
	шлак	2,15	20,7	6,9	7,9	6,9	4,3	13,8	20,2	13,0	5,0	
	Назаровский уголь — Новосибирская ТЭЦ-3 (IV очередь)											
БКЗ	ФК	3,06					0,7	3,1	5,6	15,9	28,4	46,3
	+ 1пГЭ	3,16					0,5	2,0	4,0	12,3	24,0	57,2
	+ 2пГЭ	3,14					0,5	0,9	2,6	12,9	22,5	60,6
	+ 3пГЭ	3,17							0,7	4,0	20,4	75,2
	+ 4пГЭ	3,21							0,5	2,3	9,4	87,8
	(шлак*)	2,96	12,1	6,3	21,7	37,4	12,1	8,5	1,7	0,2		
	Назаровский уголь — Назаровская ГРЭС											
ПК	1пГЭ	3,10			0,8	0,4	0,4	1,4	33,6	28,0	10,0	25,4
	+ 2пГЭ	3,09			0,6	0,2	0,2	5,4	20,6	19,0	15,0	39,0
	+ 3пГЭ	3,01			0,4	0,4	0,4	0,4	19,4	19,0	20,0	40,0
	(шлак*)	3,15	1,8	24,9	57,7	12,1	1,8	1,0	0,3	0,2	0,1	
	Ирша-Бородинский уголь — Иркутская ТЭЦ-6											
	1пГЭ	2,4					1,7	8	18,6	18,1	30,4	23,2
	(шлак*)	2,65	11,6	14,9	33,3	23,7	8,8	6,2	1,4	0,1		
	Подмосковный уголь — Алексинская ТЭЦ											
ПК	БЦ	2,59				0,2	0,3	0,8	2,6	8,9	16,7	70,5
	шлак	2,82	9,4	1,0	2,1	4,2	4,9	18,9	34,9	14,9	9,7	
ТП	БЦ	2,42					0,1	1,4	8,0	20,4	16,3	51,8
	шлак	2,80	12,1	1,0	1,8	3,2	4,3	20,9	33,3	15,3	8,1	
	Подмосковный уголь — Новомосковская ГРЭС											
„Шихау"	БЦ	2,41					0,2	0,8	4,8	16,9	15,7	61,6

Продолжение табл. 2-1

Котлоагрегат	Золоуловители и разновидность шлака	ρ_a, г/см³	Процентное содержание фракций, мм									
			>10	10÷5	5÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,125	0,125÷0,063	0,063÷0,04	<0,04
ЛМЗ	ЖУ	2,53					0,5	1,7	10,4	38,0	27,6	21,8
	+											
	БЦ	2,50					0,2	0,5	2,3	10,1	13,8	73,1
БКЗ	ОК	2,83					0,2	0,2	43,2	38,5	11,5	6,4
	+											
	1пГЭ	2,42					0,3	0,8	10,8	25,6	19,0	43,6
	+											
	2пГЭ	2,33							2,8	12,2	12,4	72,6
	+											
	3пГЭ	—						0,5	3,0	14,4	11,3	70,8
	+											
	4пГЭ	2,38						0,2	1,8	8,2	7,6	82,2
	шлак*	2,59	12,5	8,5	10,5	9,0	5,0	22,0	13,5	12,0	5,5	1,5
	Подмосковный уголь — Щекинская ГРЭС											
СП	2пВЭ	2,32					0,5	5,1	16,8	33,6	24,0	20,0
	шлак	2,76	11,8	5,4	5,9	6,8	7,8	12,2	28,3	15,8	4,0	2,0
	БЦ	2,56				0,1	0,8	12,1	27,6	38,0	13,8	7,6
	+											
ПК	1пГЭ	2,36					0,2	4,0	12,3	27,0	16,9	39,6
	+											
	2пГЭ	2,26						1,2	5,1	16,6	14,3	62,8
	+											
	3пГЭ	2,28						0,9	1,9	14,0	12,8	70,4
	шлак*	—	3,0	4,7	5,5	9,7	8,0	16,1	31,4	15,1	5,0	1,5
	Львовско-Волынский уголь — Бурштынская ГРЭС											
ТП	1пГЭ	2,28				0,3	2,3	5,5	26,5	32,7	19,1	13,6
	+											
	2пГЭ	2,35					1,0	4,2	18,6	28,1	21,8	26,3
	+											
	3пГЭ	2,46					0,4	0,7	8,2	19,3	21,4	50,0
	+											
	4пГЭ	2,47						0,3	5,9	16,3	17,6	59,9
	(шлак*)	2,45	19,0	9,0	37,0	26,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	
	Львовско-Волынский уголь — Добротворская ГРЭС											
ТП	МЗсТВ	—					0,6	0,7	10,9	17,3	16,0	54,5
	шлак*	2,2		7,0	9,5	10,1	8,0	13,5	33,0	14,6	3,5	1,5
	Азейский уголь — Иркутская ТЭЦ-9											
	МЗсТВ	2,28					0,2	1,7	8,9	28,2	39,0	22,0
	*шлак**	1,94	34,1	10,6	5,9	4,3	3,7	10,0	13,7	10,0	5,8	1,9
	Черемховский уголь — Иркутская ТЭЦ-10											
ТП	МЗ	2,44					0,4	1,5	9,1	30,0	22,0	36,0
	шлак	1,96	32,2	12,7	15,5	8,2	0,7	9,5	10,7	9,7	0,8	
	Ангренский уголь — Ангренская ГРЭС											
ТП	БЦ	2,62								0,4	9,7	89,9
	ЦН	2,78						3,4	12,1	35,1	30,6	18,8
	+											
	1пГЭ	2,50							0,2	0,7	4,5	94,6
	+											
	2пГЭ	2,56							0,7	1,0	5,4	92,9
	+											
	3пГЭ	2,59						0,2	0,3	0,3	0,7	98,5
БКЗ	шлак	2,48	5,6	7,3	7,3	14,9	15,2	25,1	13,8	6,5	2,1	2,2
	БЦ	2,39					1,0	8,0	8,8	10,5	15,0	56,7
	+											
	1пГЭ	2,47					0,7	2,5	4,1	5,8	8,0	78,6
	+											
	2пГЭ	2,43						1,2	2,0	3,8	5,3	87,7
	+											

Продолжение табл. 2-1

Котлоагрегат	Золоуловители и разновидность шлака	$\rho_д$, г/см³	Процентное содержание фракций, мм									
			>10	10÷5	5÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,125	0,125÷0,063	0,063÷0,04	<0,04
	3пГЭ	2,46						0,8	1,3	3,4	6,3	88,2
	(шлак*)	2,75	2,0	9,8	54,9	25,2	4,0	2,0	0,8	0,8	0,4	0,1
	Челябинский уголь — Южно-Уральская ГРЭС											
	1пГЭ	2,26						6,5	28,5	38,5	18,0	8,5
	+											
	2пГЭ	2,20						3,6	16,8	32,0	25,8	21,8
ПК	МЗ	2,24					0,2	3,0	10,7	19,3	21,1	45,2
	БЦ	2,17						4,0	11,0	23,0	17,0	45,0
	шлак	2,23	17,6	12,4	14,8	6,8	2,4	17,6	15,6	8,4	2,2	2,2
	Челябинский уголь — Челябинская ТЭЦ-2											
БКЗ	МЗсТВ	2,17							5,0	11,0	21,0	63,0
		2,15	28,0	19,0	15,5	9,0	6,5	6,0	6,0	7,0	3,0	
	Челябинский уголь — ТЭЦ Челябинского металлургического завода											
ТП	БЦ	2,06					2,0	3,0	10,0	16,0	31,0	38,0
	шлак	2,17	30,0	13,0	7,0	5,0	4,0	6,0	12,0	4,0	2,0	1,0
„Фостер-Виллер"	(шлак)	2,48	23,3	24,2	28,3	12,4	0,9	0,4	0,3	0,2		
	Ташкумырский и др. угли — Ферганская ТЭЦ											
ТП	БЦ	2,06					0,7	4,9	22,5	42,4	18,4	11,1
	шлак	1,85	13,0	29,0	16,4	7,0	2,9	7,6	9,3	8,6	3,6	2,6
	Харанорский уголь — Читинская ГРЭС											
БКЗ	МЗс ТВ	2,24						1,0	5,5	15,1	16,1	62,3
	МЗс ТВ	2,18				0,5	1,0	5,5	9,6	18,6	16,6	48,2
	шлак	2,38		2,6	4,1	5,3	7,5	28,6	27,6	16,8	4,7	2,8
	Кизил-Кияский и др. угли — Кувасайская ГРЭС											
ЦКТИ	ОК	2,39							1,0	18,0	23,0	58,0
	+											
	БЦ	2,25						0,9	7,5	2,4	24,0	46,2
	БЦ	2,62						0,2	2,2	29,4	39,0	29,2
	шлак	2,30	13,2	11,1	7,8	6,2	4,2	14,6	18,6	16,3	5,8	2,2
	Ткварчельский и др. угли — Ткварчельская ГРЭС											
„Бабкок-Вилькок"	МЗ	2,28						2,1	10,1	22,8	18,3	46,7
	шлак	2,34	32,4	7,0	3,7	3,0	3,1	13,4	16,0	15,8	4,0	1,6
	Воркутинский уголь — Воркутинская ТЭЦ-1											
„Комбашен"	ОК	2,20			2,2	0,2	0,8	5,9	35,9	40,8	9,8	4,4
	+											
	БЦ	2,14						0,5	3,5	23,7	30,0	42,3
	шлак*	2,00	31,9	11,7	6,7	2,4	2,6	9,6	16,4	11,5	4,6	2,6
БКЗ	БЦ	2,14						0,8	6,5	23,2	23,4	46,1
	шлак	2,15			1,0	1,0	1,0	14,3	43,4	26,0	8,2	5,1
	Воркутинский уголь — Воркутинская ТЭЦ-2											
ТП	БЦ	2,12					0,5	1,5	5,1	24,0	24,3	44,6
	шлак	2,12	37,1	7,0	6,3	3,2	2,0	6,1	10,6	16,8	6,9	4,0
БКЗ	МЗ	2,16					0,5	6,0	10,1	23,2	19,2	41,0
	шлак	2,17	24,5	10,5	7,0	6,9	5,6	18,5	12,9	8,1	3,4	2,6
	Интинский уголь — Интинская ТЭЦ											
„Дукла"	БЦ	2,26						2,1	6,8	14,1	16,0	61,0
	шлак	2,39		2,8	1,8	2,0	3,5	29,2	35,3	16,8	5,3	3,3
БКЗ	БЦ	2,25						1,5	8,0	17,5	18,0	55,0
	шлак	2,16	25,4	9,8	5,8	5,0	4,7	11,0	18,2	13,5	4,4	2,2

Продолжение табл. 2-1

Котлоагрегат	Золоуловители и разновидность шлака	ρ_a, г/см³	Процентное содержание фракций, мм									
			>10	10÷5	5÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,125	0,125÷0,063	0,063÷0,04	<0,04
	Интинский уголь — Интинская районная коммунальная котельная											
	БЦ	2,24				5,8	9,8	32,2	26,9	12,5	9,0	3,8
	шлак	2,20	32,0	26,2	21,1	7,2	2,2	2,2	1,3	1,2	3,0	3,6
	Интинский и воркутинский угли — Кировская ГРЭС											
	БЦ	2,30					1,1	5,1	12,1	29,2	18,1	34,4
	шлак	2,07	17,2	11,8	7,6	9,0	6,8	15,4	14,4	9,4	2,2	1,2
	Карагандинский уголь — Алма-Атинская ГРЭС											
	МЗсТВ	2,18						0,9	4,8	15,2	18,1	61,0
	шлак	2,06	1,6	5,6	9,3	4,6	2,8	13,9	28,4	24,7	6,1	3,0
	ОК	2,05					0,6	2,7	11,6	27,6	22,2	35,3
БКЗ	+											
	1пГЭ	2,07										
	+							3,0	7,0	19,0	19,0	52,0
	2пГЭ	2,05										
	+							0,7	3,7	15,2	17,9	62,5
	3пГЭ	2,14					0,4	1,0	3,4	15,1	17,8	62,3
	ОК				1,8	8,0	11,3	26,1	20,1	18,6	10,3	3,8
„Бабкок-Вилькок"	+											
	БЦ	2,20			5,5	1,3	0,5	1,0	1,5	7,1	17,6	65,6
	ЦС	2,10						1,0	4,0	15,6	17,2	62,2
	шлак		10,4	5,0	7,6	13,4	11,3	24,0	16,9	7,8	2,0	1,6
	Гусиноозерский уголь — Улан-Удэнская ТЭЦ											
	МЗ	2,42						3,3	14,0	27,0	23,7	32,0
	шлак	1,74	51,7	18,2	9,3	5,6	2,4	4,8	3,1	2,9		
	Райчихинский и др. угли — Хабаровская ТЭЦ-2											
	МЗ	2,42						3,0	10,1	19,7	18,7	48,5
ТП	БЦ	2,47				0,5	1,5	6,0	10,0	17,2	17,6	47,2
	МЗсТВ	2,52					0,5	4,0	9,6	19,3	19,8	46,8
	шлак	1,78			19,6	42,1	17,6	13,4	3,6	1,7	0,8	1,2
БКЗ	МЗ	2,29						1,0	6,0	15,1	20,6	57,3
	шлак	2,38	19,9	16,3	9,5	5,7	8,2	28,1	9,3	2,1	0,4	0,5
	Райчихинский уголь — Райчихинская ГРЭС											
	МЗсТВ	—						2,0	6,6	13,5	15,6	62,3
БКЗ	шлак	—	9,7	2,5	2,1	7,4	13,2	47,6	12,3	3,2	1,2	0,8
	МЗсТВ	2,56						2,2	7,0	15,6	15,2	60,0
ЦКТИ	БЦ	2,39						0,5	4,0	15,6	20,6	59,3
	БЦ	2,47						0,5	4,0	14,6	17,1	63,8
	шлак	2,53					0,5	13,6	32,1	32,1	14,1	7,6
	Реттиховский и др. угли — Владивостокская ТЭЦ-2											
	МЗ	1,97					0,5	3,6	11,4	16,3	26,2	42,0
	ФК	—			1,5	11,0	15,6	22,1	18,1	20,2	8,5	3,0
БКЗ	+											
	1пГЭ	—				2,5	4,0	9,5	11,0	21,6	17,1	34,3
	+											
	2пГЭ	—				0,5	1,0	7,6	15,1	30,4	23,2	22,2
	+											
	3пГЭ	—						2,5	9,2	29,5	21,8	37,0
	шлак	—		5,5	25,0	27,7	12,8	16,3	8,4	2,8	0,9	0,6
	Подгородненский и др. угли — Артемовская ГРЭС											
	1пГЭ	2,14					0,5	4,0	11,1	26,3	20,7	37,4
	+											
БКЗ	2пГЭ	2,12						1,0	3,0	16,6	19,1	60,3
	+	—										
	3пГЭ	—						0,5	2,0	12,1	19,1	66,3
	шлак		23,2	7,8	12,0	12,5	8,8	14,6	10,5	6,9	2,2	1,5

Продолжение табл. 2-1

Котлоагрегат	Золоуловители и разновидность шлака	ρ_a, г/см³	Процентное содержание фракций, мм									
			>10	10÷5	5÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,125	0,125÷0,063	0,063÷0,4	<0,04
„Комбашен"	ОК + БЦ	2,14 2,12				0,9	1,4 0,5	10,2 0,5	22,0 5,0	25,2 19,6	13,3 22,2	27,0 52,2
БКЗ	МЗсТВ	—					1,0	2,0	7,6	21,2	20,7	47,5
„Бабкок-Вилькок"	ЦС	—				2,6	2,5	7,6	10,1	11,7	11,7	53,8
БКЗ	МЗсТВ шлак	2,14 1,87	26,6	13,5	14,4	12,0	8,1	2,0 12,4	6,5 7,4	19,1 4,5	19,6 1,8	52,8 1,3
Реттиховский уголь — Партизанская ГРЭС												
ТП	БЦ	2,04					0,5	1,5	5,6	20,8	23,3	48,3
Подгородненский и партизанский угли												
ТП	МЗсТВ	2,17						0,4	6,6	23,6	29,2	40,2
Реттиховский уголь												
ТП	„	2,24						1,0	6,0	24,2	27,9	40,9
Реттиховский и подгородненский угли												
ТП	„ шлак	2,13 1,93	12,0	11,9	22,8	12,9	5,2	8,6	2,0 8,8	13,6 10,3	29,1 4,6	55,3 2,9
Партизанский и подгородненский угли												
ТП	шлак	1,78	23,7	15,6	17,0	9,2	4,6	6,8	9,5	8,2	3,4	2,0
Реттиховский уголь												
БКЗ	шлак	2,0	56,9	5,6	3,7	3,0	2,3	4,9	7,0	9,4	4,5	2,7
Лермонтовский уголь — Сахалинская ГРЭС												
БКЗ	МЗсТВ шлак	2,0 1,95	24,9	9,6	13,2	12,3	0,5 8,5	2,0 13,5	8,1 8,9	20,1 5,7	20,1 2,0	54,2 1,4
Аркагалинский уголь — Аркагалинская ГРЭС												
	БЦ шлак	— 22,2	24,9	23,2	17,9	0,1 9,2	0,7 4,2	2,9 5,0	10,5 8,8	12,5 4,4	15,9 1,5	57,4 0,9
ТП	БЦ шлак	2,51 —	19,7	8,4	9,9	5,4	4,2	2,0 6,6	31,7 20,8	37,9 14,0	17,1 6,3	11,3 4,7
Ургальский и др. угли — Магаданская ТЭЦ												
БКЗ	БЦ шлак МЗсТВ шлак	— 1,58 2,14	86,3 6,4	5,9 21,7	2,1 25,7	1,4 12,0	0,8 0,8 4,7	0,2 0,8 0,5 6,0	2,0 1,4 10,5 12,8	3,8 1,0 16,6 6,3	16,0 0,2 23,8 2,4	77,2 0,1 48,6 1,0
Бикинский уголь — Приморская ГРЭС												
БКЗ	шлак МЗсТВ шлак МЗсТВ шлак	1,82 2,08 1,92 2,06 1,90			10,1 6,5 8,5	16,8 11,6 6,4	12,1 1,4 10,9 1,0 10,7	30,7 8,6 25,8 5,0 30,7	22,8 20,7 28,9 19,0 27,1	5,5 21,4 9,3 21,0 10,0	1,5 20,7 4,0 23,0 4,2	0,5 27,2 3,0 31,0 2,4
Нерюнгринский уголь — Чульманская ГРЭС												
ЦКТИ	ОК	2,0						7,8	37,1	32,8	17,1	5,2
	шлак	2,26	42,6		19,3	5,2	4,2	6,4	8,1	5,8	4,9	3,5

Продолжение табл. 2-1

Котлоагрегат	Золоуловители и разновидность шлака	$\rho_д$, г/см³	Процентное содержание фракций, мм									
			>10	10÷5	5÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,125	0,125÷0,063	0,063÷0,4	<0,04
	МЗсТВ							3,1	12,4	14,0	25,9	44,6
	шлак	2,28			7,8	7,8	4,3	10,6	22,8	17,5	17,1	12,1
	МЗсТВ							0,5	8,8	12,5	23,7	55,3
	шлак	2,07	47,7		8,8	2,9	2,6	7,0	12,0	8,5	5,9	4,6
						Торф-Шатурская ГРЭС						
„Гарбе" (топливо не измельчалось)	ОК	2,40			2,3	6,7	6,0	42,0	39,0	3,6	0,2	0,2
	+											
	ОК	2,45			1,3	3,8	3,4	34,2	30,0	13,9	8,0	5,4
	+											
	БЦ	2,32			0,6	5,1	5,5	14,6	26,1	24,6	10,1	13,4
„Стерлинг"	ОК	2,53					1,1	30,7	25,0	16,5	10,9	15,8
	+											
	ОК	2,72					1,6	4,9	15,4	27,2	20,2	30,7
	+											
	БЦ	2,42				0,7	0,3	2,7	9,7	21,5	22,0	43,1
	шлак	2,01	3,4	7,2	13,2	11,7	10,7	37,1	14,1	1,6	0,6	0,4
						Торф-Рижская ТЭЦ-1						
ТП	ЦС	2,80					2,6	2,5	9,0	23,9	34,4	27,6
	шлак	2,1		0,4	5,1	15,2	10,8	32,6	26,8	5,0	2,6	1,5
						Торф-Смолевичская ГРЭС						
„Штейнмюллер"	ЖУ	2,90					0,2	8,2	28,0	31,6	20,0	12,0
	шлак	1,90		0,7	11,3	35,5	18,5	21,3	7,7	1,8	1,0	1,3
						Торф-Ярославская ТЭЦ-1						
ПК	МЗсТВ	—							2,0	21,0	22,0	55,0
	БЦГ	—							8,6	9,5	24,3	57,6
	+											
	БЦО	—							9,0	9,1	24,4	57,5
	шлак	2,9			3,0	5,0	2,0	7,0	33,0	28,0	12,0	10,0
						Торф-Ленинградская ТЭЦ-15						
	БЦ	2,74					0,5	0,5	5,0	52,0	18,0	23,0
	+											
	ЦС	2,70					0,3	1,7	8,4	29,3	19,0	41,3
						Торф-Кировская ГРЭС-8 (Ленинградская обл.)						
ПК	БЦ	2,80			0,2	1,2	2,7	13,0	23,9	31,1	17,2	10,7
	+											
	ЦС	2,76				0,4	1,0	12,4	24,8	27,0	16,1	18,3
	шлак	1,66	3,5	8,2	28,1	26,6	10,4	10,8	4,9	3,7	2,6	0,2
						Опытное сжигание тростникового торфа						
	зола	3,25										
		3,4					0,6	2,2	7,8	34,5	35,1	19,8
	шлак	2,42			20,9	21,6	18,8	22,9	10,3	3,8	1,0	0,7
						Эстонский сланец — Эстонская ГРЭС						
ТП	КС	3,04						10,6	41,0	34,1	9,1	5,2
	+											
	БЦ	2,96						1,0	6,2	32,5	31,1	29,2
	+											
	П	3,07							1,6	7,0	10,3	81,1
	+											
	1пГЭ	3,06								1,6	10,6	87,8
	+											
	2пГЭ	2,93								1,8	15,4	82,8

Продолжение табл. 2-I

Котлоагрегат	Золоуловители и разновидность шлака	ρ_a, г/см³	Процентное содержание фракций, мм									
			>10	10÷5	5÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,125	0,125÷0,063	0,063÷0,4	<0,04
	+											
	3пГЭ	2,87								3,6	28,2	68,2
	+											
	4пГЭ	2,89							0,7	0,5	0,8	98,0
	шлак	2,73				4,0	16,0	34,0	23,0	15,7	4,6	2,7
Эстонский сланец — Прибалтийская ГРЭС												
ТП	БЦ	2,93						3,8	9,6	16,9	23,6	46,1
	+											
	1пГЭ	2,95						3,5	22,6	28,3	14,5	31,1
	+											
	2пГЭ	2,69							4,3	6,4	7,4	81,9
	+											
	3пГЭ	2,93							2,4	7,3	6,2	84,1
	+											
	4пГЭ	2,95							1,0	4,0	13,6	81,4
	шлак	2,95			15,1	27,3	15,8	23,9	8,6	4,8	2,5	2,0
Эстонский сланец — ТЭЦ г. Кохтла-Ярве												
БКЗ	ОК	3,14			0,3	0,2	0,3	2,3	33,4	43,7	12,3	7,5
	+											
	БЦ	2,87							2,7	17,1	17,4	62,8
	шлак	2,74			0,4	4,6	0,6	14,1	16,9	40,3	13,1	4,0
Эстонский сланец — ТЭЦ г. Ахтме												
ЦКТИ	БЦ	2,95					0,1	1,8	7,3	18,1	20,6	52,1
„Букау"	БЦ	2,93						2,1	14,0	25,5	18,1	40,3
БКЗ	ОК	2,84					0,9	22,2	41,6	24,1	7,9	3,3
	+											
	БЦ	2,91						0,2	3,7	21,1	23,1	51,9
	шлак	2,69				0,8	2,2	26,5	30,7	24,4	9,8	5,6
Эстонский сланец — Установка с твердым теплоносителем Сланцехимического завода «Кивиыли»												
	ОК	2,30						0,8	0,1	13,1	3,3	82,7
	БК	2,64						3,0	4,0	6,8	54,6	31,6
	+											
	БЦ	2,93						0,8	4,1	29,1	58,0	8,0
Кашпирский сланец — Сызранская ТЭЦ												
ЦКТИ	1пГЭ	2,70							5,0	16,0	5,0	74,0
Гдовский сланец — ТЭЦ г. Сланцы												
БКЗ	БЦ	2,76						0,6	4,9	14,1	25,2	55,2
	шлак	2,78			14,0	20,0	18,0	25,5	5,0	14,0	1,8	1,7

Примечания: 1. Обозначения: шлак — твердый шлак и (шлак) — жидкий шлак, * — шлак измельчается дробилкой, ** — шлак удаляется из шлаковой ванны гидросмывом или шнеком.

2. Золоуловители, на которых отбирались пробы золы: ФК — форкамера; ОК — осадительная камера; КС — камера Соболева; П — предполье; КК — конвективная камера; БЦ — батарейный циклон; ЦН — циклон НИИОГАЗ; 1, 2, 3, 4 — количество полей вертикального (В) или (Г) горизонтального электрофильтра (Э); ЖУ — жалюзийный золоуловитель; знак + — последовательное включение одного золоулавливающего аппарата в другой; МЗ — мокрый золоуловитель (прутковый, конструкции ОРГРЭС); МЗ с ТВ — мокрый золоуловитель с трубой Вентури; БЦГ и БЦО — батарейный циклон, соответственно, загрязненного и очищенного газа.

При обработке экспериментальных данных были учтены условия образования шлака в топках котлоагрегатов, влияние на состав этого материала специфических свойств различного топлива, а также накопленный опыт эксплуатации систем ГЗУ многих ТЭС. На основании отмеченного поступающий в каналы ГЗУ шлак был разделен на шесть групп: 1 — сланцев; 2 — торфа; 3 — неизмельченный — угольных топлив; 4 — измельченный — угольных топлив: 5 — жидкий измельченный; 6 — жидкий неизмельченный. Кроме того, твердый неизмельченный шлак угольных топлив был разделен на три подгруппы; а) мелкий; б) средней крупности; в) крупный. К мелкому, кроме шлака торфа и сланцев, относятся тугоплавкий шлак угольных топлив, а к крупному — легкоплавкий.

Полученные результаты позволяют утверждать, что шлак сланцев — наиболее мелкий по составу, а наиболее крупный — жидкий неизмельченный шлак угольных топлив. Из угольных топлив наиболее мелким является мелкий неизмельченный шлак.

2. Выбор расчетного состава золошлакового материала при проектировании

Зола и шлак транспортируются на отвал совместно или раздельно.

При раздельном удалении золы гранулометрический состав необходимо принимать в зависимости от рода твердого топлива и конструкции пылеугольных мельниц согласно табл. 2-2.

Таблица 2-2

Гранулометрический состав золы

Зола	Процентное содержание фракций, мм							Средняя крупность d_{50}, мм		
	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1	0,1—0,05	0,05—0,02	0,02—0,01	<0,01	минимальная	осредненная	максимальная
Угольные топлива:										
барабанно-шаровые мельницы	—	4	9	21	39	22	5	0,03	0,035	0,045
молотковые мельницы	—	4	12	25	39	15	5	0,035	0,039	0,05
среднеходовые валковые мельницы	—	5	9	20	56	10	—	—	0,037	—
мелющие вентиляторы	—	8	15	22	31	18	6	—	0,043	—
Сланцы:										
молотковые мельницы	—	2	12	25	38	16	7	—	0,040	—
Торф:										
молотковые мельницы	5	5	27	32	19	8	4	0,04	0,075	0,1

Таблица 2-3

Гранулометрический состав шлака

Шлак	Процентное содержание фракций, мм										Средняя крупность d_{50}, мм		
	40—20	20—10	10—5	5—2	2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1	0,1—0,05	<0,05	минимальная	осредн.	максимальная
Угольные топлива:													
твердый измельченный (дробилками)	—	11	10	9	5	6	19	22	13	5	0,25	0,31	0,8
твердый неизмельченный:													
мелкий $t_г > 1350°$ С				8	7	6	14	35	20	10	0,12	0,17	0,25
средней крупности ($t_г$ = 1250—1350° С)	7	8	6	14	11	11	12	15	12	4	0,50	0,80	2,0
крупный ($t_г$ = 1250° С)	46	16	7	9	3	3	3	6	3	4	7,0	17,0	22,0
жидкий измельченный	9	16	27	32	12	2	2	—	—	—	3,0	5,2	7,0
жидкий неизмельченный	37	23	20	13	5	2	—	—	—	—	5,0	14,0	25,0
Сланцы	—	—	—	6	4	19	25	29	11	6	0,15	0,28	0,50
Торф	—	—	7	13	19	21	21	11	6	2	0,4	0,69	1,2

Примечание. Максимальный размер кусков шлака, поступающих в каналы ГЗУ, составляет 80—100 мм.

Таблица 2-4

Гранулометрический состав смеси золы и шлака

Смесь золы и шлака	Процентное содержание фракций, мм												Средняя крупность d_{50}, мм		
	40—20	20—10	10—5	5—2	2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1	0,1—0,05	0,05—0,02	0,02—0,01	<0,01	миним.	осредн.	максим.
Угольные топлива:															
твердый измельченный	—	1,6	1,5	1,4	0,7	0,9	6,3	13,4	23,2	34,0	12,7	4,3	0,045	0,055	0,065
твердый неизмельченный:															
мелкий	—	—	—	1,2	1,1	0,9	5,5	15,4	24,2	34,7	12,7	4,3	0,04	0,050	0,06
средней крупности	1,1	1,2	0,9	2,1	1,6	1,6	5,2	12,5	23,0	33,8	12,7	4,3	0,045	0,055	0,065
крупный	6,9	2,4	1,1	1,3	0,4	0,4	3,9	11,1	21,7	33,8	12,7	4,3	0,05	0,06	0,07
жидкий измельченный	3,6	6,4	10,8	12,8	4,8	0,8	3,2	7,2	15,0	23,4	9,0	3,0	0,05	0,06	0,07
Сланцы	—	—	—	0,9	0,6	2,8	5,5	14,6	22,8	33,3	13,6	5,9	—	0,045	—
Торф	—	—	0,4	0,6	0,9	5,8	5,8	26,2	30,7	18,2	7,6	3,8	—	0,08	—

При раздельном удалении шлака средний гранулометрический состав необходимо принимать в зависимости от рода сжигаемого твердого топлива, системы шлакоудаления и температуры плавления $t_г$ согласно табл. 2-3.

Для конкретных ТЭС состав золы и шлака принимается согласно табл. 2-1.

При совместном удалении гранулометрический состав смеси продуктов сжигания должен быть получен на основании пересчета по известному содержанию шлака в общем количестве золошлакового материала, выдаваемого ТЭС. При этих вычислениях содержание шлака следует принимать либо на основании технологического задания, либо на основании данных литературы в зависимости от конструкции котлоагрегата — для топок с холодными воронками 15%, для топок с утепленными воронками 25%, для однокамерных топок с жидким шлакоудалением 40% и для циклонных топок ВТИ с жидким шлакоудалением 45—55%. В табл. 2-4 приводятся наиболее характерные средние гранулометрические составы смеси золы и шлака различных твердых топлив, вычисленных на основании данных табл. 2-2 и 2-3.

При этих вычислениях было принято: гранулометрический состав шлака согласно табл. 2-3, золы — табл. 2-2, причем для угольных топлив состав золы был принят для молотковых мельниц (как наиболее распространенных на ТЭС); ТЭС оборудованы котлоагрегатами либо с холодными воронками при твердом шлакоудалении (для твердого шлака), либо с однокамерными топками при жидком шлакоудалении (для жидкого шлака). Отметим, что для торфа выход шлака был принят на основании производственных данных равным 5%.

3. Агрегатная плотность золы и шлака

Агрегатная плотность является основной физической величиной, характеризующей массу пробы золошлакового материала, которую необходимо использовать при расчетах гидротранспорта, абразивного износа пульпопроводов и пр. В табл. 2-5 раздельно приводятся данные по агрегатной плотности золы, жидкого и твердого шлака различных видов твердого топлива. При совместном удалении золы и шлака агрегатная плотность смеси должна быть определена на основании расчета по известному выходу золы и шлака с ТЭС.

Таблица 2-5

Средняя агрегатная плотность золы и шлака (г/см³) различного твердого топлива

Топливо	Зола	Твердый шлак	Жидкий шлак
Уголь:			
назаровский	3,2—3,0	—	3,0
подмосковный	2,8—2,35	2,8—2,3	—
ангренский	2,6—2,45	2,4—2,2	2,7
райчихинский	2,55—2,40	2,4—2,0	—
донецкий (Г, ГР)	2,45—2,3	2,0	2,65
донецкий (промпродукт, шлам)	2,2—2,1	2,05	—
львовско-волынский	2,45—2,3	2,2	2,45
печорский	2,4—2,25	2,4—2,2	—
азейский, черемховский	2,4—2,3	2,0—1,9	—
черновский, гусиноозерский	2,4—2,3	2,3—1,7	—
кизил-кийский	2,4—2,25	2,3—2,15	—
челябинский	2,3—2,1	2,2—2,1	2,5
ташкумырский	2,3—2,1	2,0—1,9	—
ткварчельский и ткибульский	2,3	2,35	—
богословский	2,3	—	—
карагандинский	2,2—2,05	2,1—2,05	—
аркагалинский	2,2	2,2	—
реттиховский подгородненский, партизанский, артемовский	2,2—2,1	1,9—1,8	—
харанорский	2,2	—	—
воркутинский	2,15—2,10	2,15—2,0	—
кузнецкий	2,15—2,0	2,2—1,9	2,5
экибастузский	2,15—1,95	2,2—2,1	—
ургальский	2,14	1,60	—
бикинский	2,1—2,0	1,95—1,8	—
быковский, синегорский, лермонтовский	2,13	2,0—1,8	—
нерюнгринский	2,0	2,25—2,0	—
Торф:			
тростниковый	3,4—3,25	2,42	—
месторождения Ярославской обл.	3,1	2,9	—
месторождения Белорусской ССР, Латвийской ССР, Ленинградской обл.	2,8—2,35	2,8—2,3	—
месторождения Московской обл.	2,6—2,4	2,0	—
Сланец:			
эстонский	3,1—2,9	2,9—2,7	—
гдовский	2,8	2,8	—
кашпирский	2,75	2,8	—

Приложение 3

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ АБРАЗИВНОСТИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. Результаты расчета параметров гидроабразивного износа пульпопроводов по вышеприведенной методике, для систем напорного гидравлического транспорта II—III класса капитально-

сти и выше, целесообразно корректировать данными специальных экспериментальных исследований по установлению относительной абразивности применяемых золошлаковых материалов ТЭС. Ниже освещены некоторые основные вопросы методологии проведения испытаний.

2. Абразивность твердых частиц в самом общем смысле характеризует их способность с различной интенсивностью разрушать поверхностный слой деталей при контактировании. Одной из характеристик твердых частиц принята их абразивная способность в жидкой среде, так называемая гидроабразивность, когда изнашивание деталей происходит в результате механического действия твердых частиц, перемещаемых потоком жидкости, а характер разрушения и его интенсивность при прочих равных условиях зависят от направления и величины вектора скорости движущихся частиц по отношению к поверхности. Гидроабразивность может однозначно характеризовать твердый материал только в конкретных, строго ограниченных условиях проведения испытаний, когда характер воздействия частиц на изнашиваемую поверхность остается постоянным и не меняются как агрегатное состояние твердых частиц, так и прочностные свойства износостойкого материала.

3. Для определения гидроабразивных свойств твердых материалов, транспортируемых по трубопроводам, могут быть использованы устройства с вращающимися роторами, работающими по методу вращения образцов, закрепленных на вращающемся барабане, струеударные установки и экспериментальные участки труб. Из-за целого ряда преимуществ, таких как полная имитация физической картины износа нижней стенки трубопровода, удовлетворение критериев моделирования, возможность регулирования и фиксирования всех основных кинематических параметров испытания, простота изготовления и обслуживания, надежность получаемых результатов при установлении относительной гидроабразивности золошлаковых материалов ТЭС в лабораторных условиях, предпочтение следует отдать устройству, работающему по методу вращения образцов трубных материалов, закрепленных на вращающемся барабане конструкции ИГМ АН ГССР.

4. На рис. 3-1 дается эскизная схема устройства. Принцип работы устройства следующий: кассеты с образцами, заранее взвешенными на аналитических весах, выполненные обтекаемой формы с различными углами конусности, закрепляются на крышке испытательной камеры. В камеру загружается необходимое количество твердых частиц эталонного абразива и воды для получения гидросмеси заданной консистенции. Закрепляется крышка и включается привод с определенным числом оборотов с таким расчетом, чтобы относительная скорость движения

образцов с потоком в камере совпадала со скоростью движения пульпы в реальных условиях эксплуатации испытываемого материала.

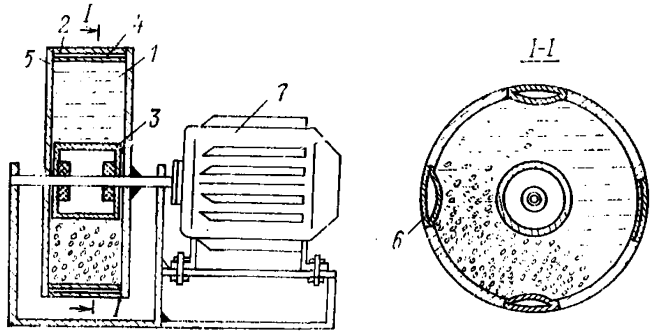


Рис. 3-1. Схема лабораторного испытательного устройства

1 — испытательная камера; *2* — вращающийся барабан; *3* — внутренний неподвижный цилиндр; *4* — испытуемые образцы; *5* — кассеты для крепления образцов; *6* — крышка для крепления кассеты; *7* — двигатель постоянного тока с регулируемым числом оборотов.

Образцы начинают перемещаться совместно с внутренней окружностью наружного цилиндра. Образовавшаяся в камере пульпа беспрепятственно скользит по кассетам обтекаемой формы, исключая при этом всевозможные отрывы и соударения твердых частиц с образцами. Из-за действия массовых и центробежных сил частицы всегда стараются прижиматься к образцам у наружной стенки барабана в нижней ее части. Происходит полная имитация физической картины износа нижних стенок гидротранспортных трубопроводов.

В камере одновременно испытывается несколько образцов, каждый из которых может быть установлен под различными углами относительно натекаемого потока. Линейный закон динамики гидроабразивного износа практически не ограничивает выбор времени проведения испытаний.

После истечения выбранного времени испытанные образцы взвешиваются и фиксируется их весовая убыль. Затем опыт повторяется заново уже для испытываемого абразивного материала.

5. Относительная абразивность сыпучих материалов определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{P_{1\text{эт}} - P_{2\text{эт}}}{P_1 - P_2}, \qquad (3\text{-}1)$$

где $P_{1\text{эт}}$, $P_{2\text{эт}}$ и P_1, P_2 — масса образца до и после износа при применении эталонных и испытываемых абразивных частиц соответственно.

6. Устройство позволяет в широком диапазоне регулировать окружную скорость вращения образцов, консистенцию гидросмеси, крупность и плотность твердых частиц.

7. Зола в основном представлена фракциями 0,01—0,1 мм. Средняя крупность золы изменяется в пределах 0,02—0,07 мм. Плотность золы колеблется в пределах 2,0—3,4 г/см^3. В зависимости от системы шлакоудаления из топок котлов образуются две разновидности шлака — твердый (сухой) и жидкий (расплавленный). Гранулометрический состав шлака представлен в основном фракциями 0,25—20 мм, при максимальном размере отдельных частиц 40—60 мм. Средняя крупность жидкого шлака колеблется в пределах 2,5—9,0 мм. Средняя крупность твердого шлака при отсутствии дробилок — 0,12—10 мм, а при наличии дробилок — 0,25—4,0 мм. Плотность жидкого шлака меняется в пределах 2,55—3,45 г/см^3, а твердого — 2,13—2,81 г/см^3.

8. Гидротранспорт золы по трубам осуществляется при скорости около 1,2 м/с, твердого шлака — 1,5 м/с и жидкого шлака — 1,8 м/с. Весовая концентрация гидросмеси при удалении золы или композиции из золы и шлака составляет 5—10%. Однако в перспективе возможно увеличение весовой концентрации твердого в пульпе до 30%. Концентрация шлаковой пульпы в настоящее время составляет 2—5%, а в пределе не должна превышать 10% по весу.

9. Учитывая вышеизложенное для золошлаковых материалов, представленных преимущественно ферроалюмо-силикатными стеклами с суммарным содержанием основных стеклообразующих компонентов Fe_2O_3, Al_2O_3, SiO_2 до 80—90%, в качестве эталона абразива следует принять кварцевый песок (песок нормальный для испытания цементов по ГОСТу 6139—78).

10. Золошлаковый материал для определения коэффициента абразивности отбирается на ТЭС, для которой выполняется проектирование, если станция действующая, или на ТЭС — аналоге в соответствии с рекомендациями приложения 2.

11. С целью исключения влияния окатанности и деградации частиц на их абразивность, были проведены специальные исследования, в результате которых определено максимально допустимое время испытания золошлаковых материалов без замены, при различных параметрах проведения эксперимента.

В табл. 3-1 приведены рекомендуемые длины относительного перемещения твердых частиц без замены в процессе их испытания на относительную абразивность. Здесь же даются величины соответствующих допускаемых интервалов времени, в течение которых абразивность твердых частиц уменьшается лишь на 15% и не требуется их замена.

12. При принятых скоростях транспортирования золы и шлака в промышленных условиях (1,2—1,8 м/с) в нижней части пульпопроводов ожидается перемещение пульпы с относительной скоростью 0,4—1,0 м/с. Поэтому при проведении экспери-

Таблица 3-1

Оптимальная продолжительность эксперимента без замены абразива

Твердость абразивных частиц по шкале Мооса	Оптимальная длина относительного перемещения L, м	Скорость вращения внешнего цилиндра, V м/с	Оптимальный интервал времени проведения эксперимента без замены абразива, мин
2—5	3000—3500	0,5	110
		0,75	70
		1,0	55
		1,25	40
		1,5	35
5—7	4200—5100	0,5	150
		0,75	100
		1,0	75
		1,25	60
		1,5	50

ментов следует принимать скорость вращения внешнего цилиндра устройства (скорость перемещения частиц относительно образцов малоуглеродистой стали), равной 0,7 м/с.

13. Анализ данных специально проведенных экспериментов показывает, что для мелко- и среднезернистых материалов (каким, в основном, и являются золошлаки) увеличение крупности и плотности частиц при сохранении неизменными других параметров испытания, вызывает пропорциональное увеличение их абразивной способности. Поэтому при проведении исследований, как правило, следует испытывать золошлаковые материалы в исходном состоянии, т. е. с реально существующей крупностью и плотностью, и определять их относительную гидроабразивность по сравнению с эталонным песком.

14. Экспериментальные исследования показали, что увеличение консистенции не вызывает изменения относительной абразивности различных сыпучих материалов при сохранении постоянными других параметров испытаний и условий контактирования частиц с поверхностью образцов. Поэтому с целью интенсификации проведения испытаний допускается увеличение консистенции пульпы до предельной величины (0,2—0,3 по объему).

15. При определении значений относительной абразивности различных сыпучих материалов необходимо строго соблюдать равенство углов встречи скользящего потока с поверхностью износа в эксперименте и в реальных условиях эксплуатации оборудования. Так, например, при имитации условий изнашивания гидротранспортных трубопроводов угол установки испытуемых образцов конструкционных материалов относительно скользящего потока гидросмеси должен равняться 3—12°.

16. Рабочие чертежи для изготовления «Устройства для испытания материалов на износ» (УИМ) трех типоразмеров: с диаметром наружного цилиндра 700 мм, 500 мм и 300 мм — разработаны в КБ Института горной механики АН ГрузССР.

Приложение 4

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ШЛАКА ПРИ ИСТИРАНИИ

При гидротранспорте продуктов сгорания ТЭС происходит разрушение частиц, что вызывает изменение гранулометрического состава транспортируемого материала. Поэтому гранулометрические составы продуктов сгорания твердого топлива непосредственно на ТЭС и поступающего из пульпопровода на отвал часто оказываются различными.

Истирание золошлакового материала изучалось в лаборатории на специальной установке и в производственных условиях на отвалах работающих ТЭС. При исследованиях в производственных условиях определялись расход пульпы, длина пульпопровода и пр., а также гранулометрический состав золы и шлака на ТЭС и на отвале.

Для оценки истирания золошлакового материала выполнялось сопоставление кривых гранулометрического состава до испытаний и после испытаний. Для аналитического выражения изменения состава материала в испытаниях использовался параметр $\frac{d_{\text{пи}}}{d_{\text{по}}} - 1$, согласно которому материал считается неистираемым при $\frac{d_{\text{пи}}}{d_{\text{по}}} - 1 \cong 0$ и истираемым при $\frac{d_{\text{пи}}}{d_{\text{по}}} - 1 > 0$, где $d_{\text{пи}}$ и $d_{\text{по}}$ — диаметры частиц кривой гранулометрического состава материала до испытаний «и» и после испытаний «о» относительной обеспеченностью «п» кривой гранулометрического состава материала $\text{П} = \text{П}\%/100\%$ (изменяется от 0 до 1): П% — обеспеченность кривой гранулометрического состава материала в процентах (изменяется от 0 до 100%).

Основной принцип проектирования гидротранспортных установок — обеспечение скоростей потока, равных или больше критических: для этих условий работы трубопровода практически все частицы сыпучего материала будут находиться во взвешенном состоянии.

При оценке степени разрушения частицы должны быть определены ее энергия движения в потоке, зависящая от его скорости, а также от массы частицы, и энергия, при которой разрушится данная частица, зависящая только от прочностных свойств слагающего ее материала.

В качестве энергетической оценки частицы в потоке пульпы была использована кинетическая энергия движения $Э = \frac{mv^2}{2}$,

где m — масса частицы, которая может быть вычислена по формуле $\frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_a$; v — скорость движения частицы в потоке, диаметр которой равен d; ρ_a — агрегатная плотность.

Для оценки прочностных свойств материала, слагающего частицы, была использована кинетическая энергия разрушения $/Э/ = \frac{mv^2_p}{2}$, где v_p — скорость, при которой разрушается частица при ее ударе о тело большей массы. Было установлено, что золошлаковый материал весьма неоднороден по прочности, т. е. имеются как прочные частицы, практически не разрушающиеся при гидротранспорте, так и частицы с низкой прочностью.

Интересно отметить, что характер разрушения жидкого и твердого шлака различен: частица жидкого шлака первоначально разрушается на ограниченное количество мелких частиц, а при увеличении скорости падения она раскалывается подобно стеклу; частицы же твердого шлака разрушаются на большое количество как мелких, так и относительно крупных частиц.

Исходя из оценки прочностных свойств золошлакового материала, можно заключить, что не все частицы при гидротранспорте будут истираться одинаково: найдется хотя и ограниченное количество частиц в данной фракции, которые своих размеров практически не изменяют. Для оценки прочностных свойств продуктов сгорания топлив в табл. 4-1 приведены осредненные значения их кинетической энергии разрушения.

Таблица 4-1

Осредненные значения кинетической энергии разрушения частиц шлака

Диаметр частиц, мм	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15
Кинетическая энергия разрушения частиц $/Э/\cdot 10^{-6}$, Дж	2,2	10	26	50	84	110	180	240	750	1500

На основании методических опытов, в которых изучалось влияние одного параметра на процесс истирания частиц при неизменных других, а также на основании производственных данных было установлено следующее:

1. Гранулометрический состав золы при тех воздействиях, которые имеют место при гидротранспорте, не изменяется. Этот вывод получен на основании лабораторных исследований с золой экибастузского (Троицкая ГРЭС), черемховского (Иркутская ТЭЦ-10), азейского (Иркутская ТЭЦ-9), ирша-бородинского (Назаровская ГРЭС) и других углей, а также на основании производственных данных, полученных на Добротворской и Кувасайской ГРЭС (раздельное удаление золы). Ввиду неизме-

няемости размеров золы при транспортировании потоком дальнейшее изложение будет посвящено лишь истиранию крупных фракций — шлака.

2. Интенсивность измельчения шлака существенно зависит от его крупности. Исследования с различными фракциями жидкого и твердого шлака показали, что чем крупнее частицы, тем интенсивность истирания больше. Было установлено, что частицы крупности 0,5—1 мм практически не истираются (параметр $D_{по} = \frac{d_{пи}}{d_{по}} - 1 \sim 0$). Частицы шлака крупностью 0,5 мм были названы предельным диаметром истирания ($d_н = 0{,}5$ мм).

3. Масса и размер одиночной частицы, как показали длительные опыты, изменяются нелинейно от пройденного пути, поскольку при испытаниях откалываются грани как малых, так и больших размеров. Опытами с одной частицей было также установлено, что интенсивность истирания жидкого шлака значительно меньше, чем твердого шлака.

4. Диаметр частиц золошлакового материала, соответствующий 100%-й обеспеченности кривой гранулометрического состава ($П = 1$), при испытаниях остается, как правило, неизменным.

5. Минимальная крупность граней, откалываемых от основной частицы, равна 0,03—0,06 мм. Если в исходном шлаке минимальная крупность частиц ($П = 0$) также равна 0,03—0,06 мм (что обычно имеет место в практике), то параметр $\frac{d_{пи}}{d_{по}} - 1 = 0$.

6. Форма частиц при истирании изменяется (частицы окатываются), стремясь в пределе к сфере. Изменением формы частиц шлака и его геометрических размеров объясняется неодинаковая интенсивность истирания пульпопроводов по длине.

7. Распределение параметра $\frac{d_{пи}}{d_{по}} - 1$ для различной обеспеченности существенно зависит от начального состава и вида шлака. При испытании однозернистого шлака, а также твердого шлака естественного состава, т. е. получаемого непосредственно на ТЭС, было установлено, что для некоторой относительной обеспеченности, названной максимальной $П_н$, параметр $(\frac{d_{пи}}{d_{по}} - 1)_{макс} = D_{макс}$ имеет максимальную величину. Характер убывания параметра $\frac{d_{пи}}{d_{по}} - 1$ при $П \gtrless П_н$ зависит от величины $П_н$. При $П_н < 0{,}5$ этот параметр асимптотически убывает как справа, так и слева, а при $П \geqslant 0{,}5$ на левой ветви ($П > П_н$) параметр $\frac{d_{пи}}{d_{по}} - 1$ убывает значительно медленнее, чем в предыдущем случае. Для твердого шлака естественного состава максимальная обеспеченность соответствует такому диаметру частиц, который ближе всего стоит для принятой в данной работе разбивки величины $П$ (см. ниже пример расчета, п. 2) к предельному диаметру измельчаемой фракции, т. е. 0,5 мм. В расчетах раз-

мер частиц, соответствующий максимальной обеспеченности $П_н$, будем обозначать $d_{пни}$. При испытании жидкого шлака естественного состава для $0{,}1 \leqslant П \leqslant 0{,}9$ не наблюдается резкого изменения параметра $\frac{d_{пи}}{d_{по}} - 1$.

8. Скорость движения частиц оказывает влияние на их истирание: чем больше скорость, тем интенсивность истирания больше.

На основании обработки результатов испытаний по истиранию продуктов сгорания твердого топлива рекомендуются следующие формулы для вычисления гранулометрического состава шлака у места выпуска пульпы из пульпопровода:

для жидкого шлака

$$\frac{d_{пи}}{d_{по}} = \begin{cases} 1 & \text{при } П = 1 \\ 0{,}18 \lg\left(1 + \sqrt{L/\Delta L}\right) \frac{Э}{[Э]} + 1 & \text{при } 0{,}1 \leqslant П \leqslant 0{,}9 \\ 1 & \text{при } П = 0, \end{cases} \qquad (4\text{-}1)$$

для твердого шлака

$$\frac{d_{пи}}{d_{по}} = \begin{cases} 1 & \text{при } П = 1 \\ D_{макс} / e^{\frac{A_и(|П - П_н|)}{1 + \sqrt[3]{(L/\Delta L)^2}}} & \text{при } 0{,}1 \leqslant П \leqslant 0{,}9 \\ 1 & \text{при } П = 0, \end{cases} \qquad (4\text{-}2)$$

где L — длина трассы пульпопровода; ΔL — условная длина, равна 1 км; $A_и$ — коэффициент, который при расчетах рекомендуется принимать равным 40, кроме случая, когда $П_н \geqslant 0{,}5$. При $П_н \geqslant 0{,}5$, т. е. $П > П_н$, величину коэффициента $A_и$ следует принимать равной 10.

При вычислении гранулометрического состава твердого шлака при истирании по зависимости (4—2) необходимо знать максимальную величину параметра $\left(\frac{d_{пи}}{d_{по}} - 1\right)_{макс} = D_{макс}$. Обработка результатов измерений гранулометрического состава шлака, подверженного истиранию, позволила получить следующую зависимость для вычисления параметра $D_{макс}$.

$$D_{макс} = \frac{d_{50\,ист}}{d_н} \cdot (1 - П_и) \frac{Э}{[Э]} \cdot \lg\left[1 + \left(\frac{L}{\Delta L}\right)^3\right] \left(e^{0{,}105 \frac{d_{пни}}{d_н}} - 1\right), \qquad (4\text{-}3)$$

где $d_{50\,ист}$ — средняя крупность истираемых фракций шлака. Для нахождения средней крупности $d_{50\,ист}$ необходимо по данным исходного состава твердого шлака, начиная от $d_{50\,пни}$ ($d_{пни}$ в этом случае будет соответствовать $П = 0$), построить кривую гранулометрического состава истираемых фракций;

$Э = \frac{m_4 v^2}{2}$ — кинетическая энергия частицы, транспортируемой потоком, средней крупностью $d_{50\,ист}$;

m_4 — масса частицы шлака крупностью $d_{50\,ист}$;

v — скорость движения частицы в потоке, которую приближенно следует принимать равной средней скорости потока.

На рис. 4-1 приводится номограмма для определения кинетической энергии частицы в потоке при известных ее диаметре и скорости.

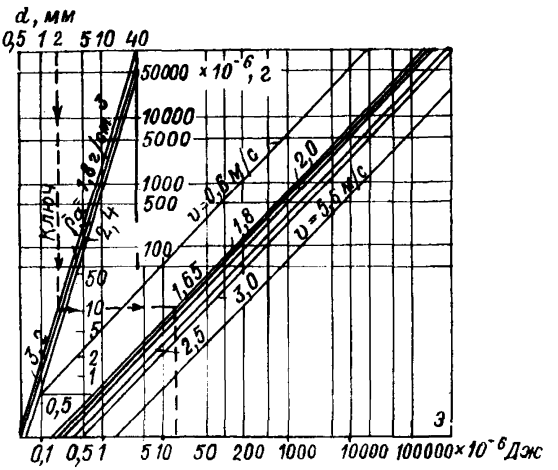


Рис. 4-1. Номограмма для определения кинетической энергии частицы в потоке пульпы при известных ее массе, агрегатной плотности и скорости.

Кинетическая энергия разрушения частиц шлака $|Э|$ при расчетах принимается согласно данным табл. 4-1 (для твердого шлака $d = d_{50\,\text{ист}}$, а для жидкого шлака $d = d_{50}$, где d_{50} — средняя крупность исходного гранулометрического состава шлака).

Для облегчения вычисления параметров $\frac{d_{\text{пи}}}{d_{\text{по}}}$ и $D_{\text{макс}}$ на рис. 4-2 и 4-3 приводятся номограммы.

На примере гидротранспорта твердого шлака (наиболее сложный расчетный случай) предлагается следующий порядок определения гранулометрического состава шлака при его истирании:

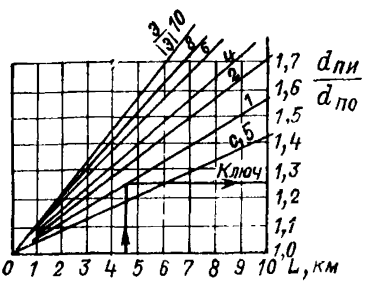


Рис. 4-2. Номограмма для определения соотношения $\frac{d_{\text{пи}}}{d_{\text{по}}}$ при известных $\frac{Э}{|Э|}$ и длине трассы пульпопровода для жидкого шлака.

1) строим, независимо от особенностей удаления золы и шлака с ТЭС, кривую гранулометрического состава шлака;

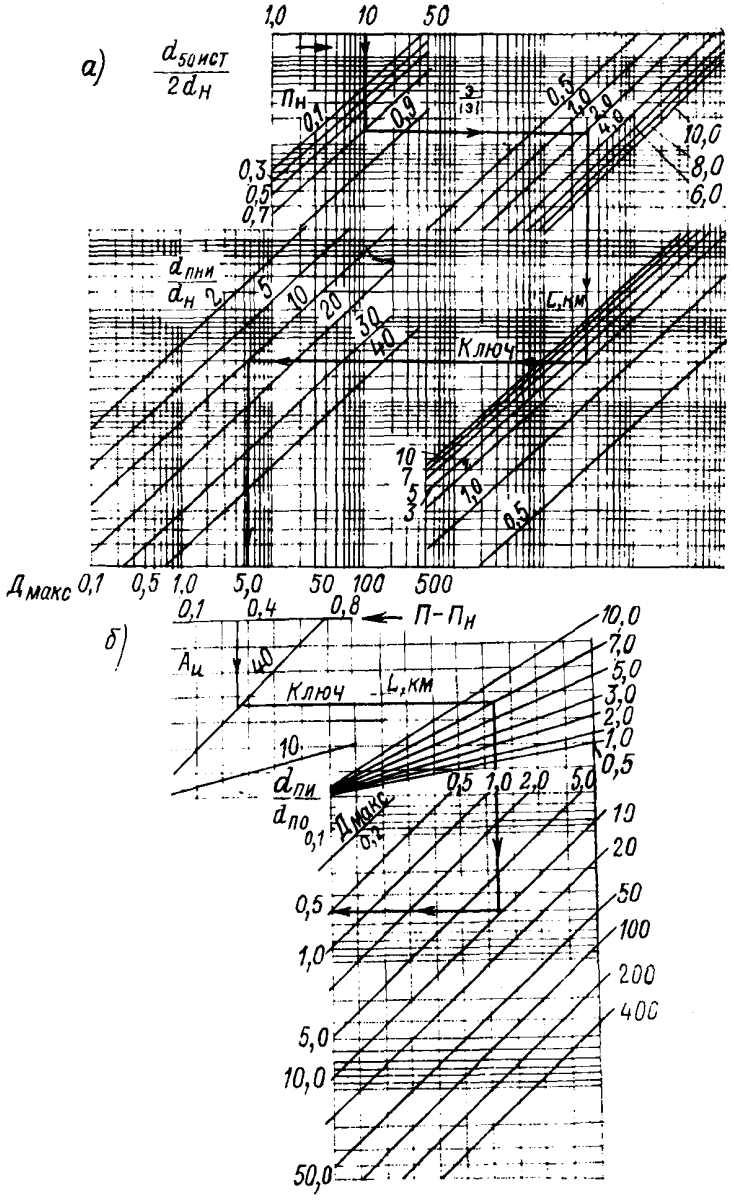


Рис. 4-3. Номограммы для определения параметра $D_{макс}$ (*а*) и соотношения $d_{пи}/d_{по}$ (*б*) для твердого шлака при известных характеристиках гранулометрического состава транспортируемого материала, параметрах потока и длине трассы пульпопровода.

Таблица 4-2

Пример расчета гранулометрического состава твердого шлака ТЭЦ 4МЗ

$П$	$d_{пи}$, мм	L, км	ΔL, км	V, м/с	$\bar{\rho}_a$, г/см³	$П_н$	$d_{50\,ист}$, мм	$d_{пии}$, мм	$d_н$, мм	Э, дж	$\lvert Э \rvert$, Дж	$\lg\left[1+\left(\frac{L}{\Delta L}\right)^3\right]$	$e^{0{,}105\frac{d_{пии}}{d_и}-1}$	$D_{макс}$	$A_и$	$\lvert П-П_н \rvert$	$1+\sqrt[3]{\left(\frac{L}{\Delta L}\right)^2}$	$e^{\frac{A_и(\lvert П-П_н \rvert)}{1+\sqrt[3]{\left(\frac{L}{\Delta L}\right)^2}}}$	$\frac{d_{пи}}{d_{по}}$	$d_{по}$, мм
1,0	50,0														—	—		—	—	50,0
0,9	35,0														10	0,4		2,64	16,1	2,2
0,7	10,0														10	0,2		1,63	25,4	0,4
0,5	5,0	5,5	1,0	1,2	2,17	0,5	16,2	5,0	0,5	$5000\times\times10^{-6}$	$2100\times\times10^{-6}$	2,22	1,86	39,8	10	0,0	4,12	1,0	40,8	0,12
0,3	0,26														40	0,2		7,0	6,7	~0,07
0,1	0,085														40	0,4		49,4	1,08	0,07
0,0	0,035														—	—		—	—	0,035

Таблица 4-3

Основные параметры, необходимые для расчета истирания шлака при гидротранспорте

Вид сжигаемого топлива	Диаметры частиц $d_{пи}$, мм обеспеченностью $П$							Максимальная обеспеченность, $П_н$	Диаметр частиц $d_{пин}$, мм	Коэффициент, $A_и$	Средняя крупность истираемой фракции шлака, $d_{50\ ист}$, мм	Отношение энергий $\frac{Э}{\lvert Э \rvert}$	Предельный диаметр истирания $d_н$, мм
	$П=0$; $d_{ои}$	$П=0{,}1$; $d_{0,1\ и}$	$П=0{,}3$; $d_{0,3\ и}$	$П=0{,}5$; $d_{0,5\ и}$	$П=0{,}7$; $d_{0,7\ и}$	$П=0{,}9$; $d_{0,9\ и}$	$П=1{,}0$; $d_{1\ и}$						
Угольные топлива													
Шлак твердый измельченный	0,03	0,07	0,18	0,31	2,0	11,0	20,0	0,7	2,0	10 ($П \geqslant 0{,}7$) 40 ($П < 0{,}7$)	5,2	2	
Шлак твердый неизмельченный:													
мелкий	0,03	0,05	0,10	0,17	0,33	1,8	5,0	0,9	1,8	10 ($П = 0{,}9$) 40 ($П < 0{,}9$)	1,6	0,57	
средней крупности	0,03	0,075	0,23	0,80	2,8	15,0	50,0	0,5	0,8		3,0	1	0,5 мм
крупный	0,03	0,17	4,1	17,0	30,0	43,0	50,0	0,3	4,3	10 ($П \geqslant 0{,}5$) 40 ($П < 0{,}5$)	22,0	1,75	
Шлак жидкий измельченный	0,25	0,5	3,0	5,2	8,9	19,0	50,0	—	—	—	5,2	4,4	
Шлак жидкий неизмельченный	0,5	2,5	6,9	14,0	26,0	41,0	50,0	—	—	—	14,0	3,0	

2) находим по кривой гранулометрического состава шлака диаметры частиц, соответствующие относительной обеспеченности $П = 0$; 0,1; 0,3: 0,5; 0,7; 0,9 и 1;

3) определяем максимальную обеспеченность $П_н$ и диаметр частиц $d_{пни}$;

4) строим при известных диаметрах частиц $d_{пни}$ и $d_{пи}$ (в табл. 4-2 $d_{пни} = 5$ мм, а известные диаметры частиц обеспеченности $П > П_н$ $d_{0,7\,и} = 10$; $d_{0,9\,и} = 35$ и $d_{1,0\,и} = 50$ мм) кривую гранулометрического состава истираемых фракций шлака и находим $d_{50\,ист}$;

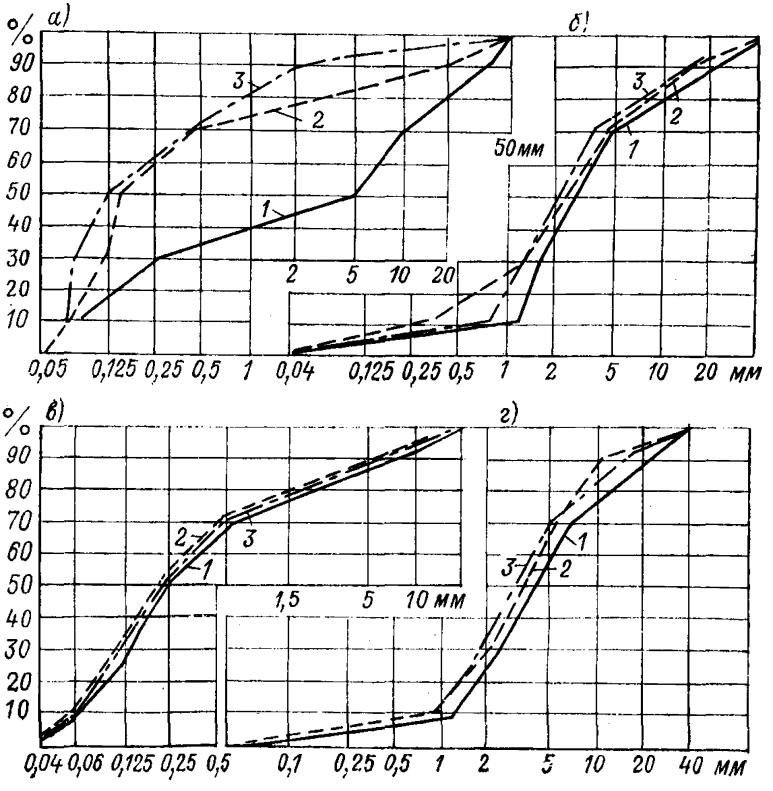


Рис. 4-4. Результаты сопоставления кривых гранулометрического состава, полученных экспериментально и на основании расчета при истирании шлака в производственных условиях при гидротранспорте

Твердый шлак: *а* — ТЭЦ ЧМЗ (средняя скорость потока v=1,2 м/с, агрегатная плотность шлака $\rho_а$=2,17 г/см³, длина транспортирования L = = 5,5 км); *в* — Щекинская ГРЭС (v=1,41 м/с, $\rho_а$=2,7 г/см³, L=6,8 км). Жидкий шлак: *б* — Черепетская ГРЭС (v=2,3 м/с, $\rho_а$=2,62 г/см³, L = = 3,5 км); *г* — Бурштынская ГРЭС (v=2,2 м/с, $\rho_а$=2,45 г/см³, L=1,4 км). Кривая гранулометрического состава шлака: *1* — на ТЭС; *2* — на выпуске из пульпопровода; *3* — на основании расчета.

5) определяем по графику, приводимому на рис. 4-1, кинетическую энергию движения, а по табл. 4-1 кинетическую энергию разрушения частицы средней крупностью $d_{50\,\text{ист}}$ в потоке;

6) вычисляем параметр $D_{\text{макс}}$, а при известном параметре $D_{\text{макс}}$ по зависимости (4-2) определяем гранулометрический состав шлака, подверженного истиранию;

7) строим кривую гранулометрического состава смеси золы и шлака, поступающих на отвал, с учетом истирания при гидротранспорте крупных фракций шлака (в случае совместного удаления золы и шлака на отвал).

В табл. 4-2 приводится пример расчета гранулометрического состава твердого шлака ТЭЦ ЧМЗ, поступающего из пульпопровода на шлакоотвал. Кривые гранулометрического состава шлака до начала испытаний и после испытаний (расчетные и экспериментальные) приведены на рис. 4-4.

В табл. 4-3 даны характерные диаметры частиц $d_{\text{пи}}$, коэффициенты $A_{\text{и}}$ и $Э/|Э|$ для гранулометрических составов различного шлака. Отметим, что скорость движения частиц в потоке пульпы при вычислении параметра $Э$ (табл. 4-3) для твердого шлака принималась равной 1,5 м/с при агрегатной плотности $\rho_{\text{а}} = 2{,}3$ г/см^3, а для жидкого шлака — 1,8 м/с при $\rho_{\text{а}} = 2{,}7$ г/см^3.

Приложение 5

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ИЗНОСА ПУЛЬПОПРОВОДОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ КРУПНОКУСКОВОГО ШЛАКА (В СЛУЧАЕ ОТСУТСТВИЯ ДРОБИЛОК)

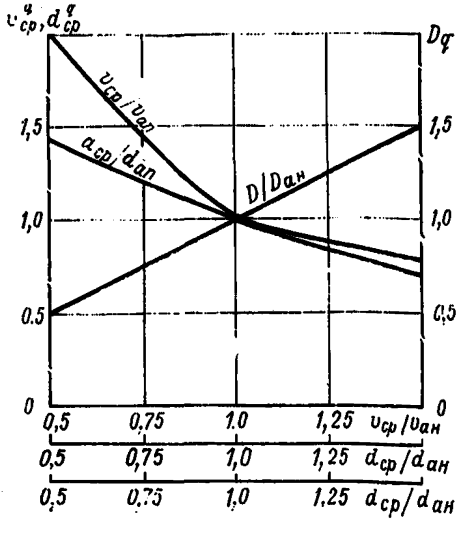


Рис. 5-1. Зависимость расчетных значений сомножителей для крупнокускового шлака от относительных параметров транспортирования.

1. Крупнокусковым условно считается жидкий или твердый шлак со средневзвешенной крупностью частиц более 4 мм, загружаемый в системе золошлакоудаления без предварительного дробления, и последующей сепарацией на решетках с размером частиц до 10 мм.

2. Основные расчеты параметров износа при транспортировании крупнокускового шлака следует проводить по методике, приведенной в разделе 2 Рекомендаций. Необходимые для расчета поправки приведены ниже.

3. Ориентировочные значения сомножителей $\left(\frac{v_{ср}}{v_{ан}}\right)^q$, $\left(\frac{d_{ср}}{d_{ан}}\right)^q$ и $\left(\frac{D}{D_{ан}}\right)$ в правой части зависимости (2) следует определять по графикам, приведенным на рис. 5-1.

Таблица 5-1

Параметры неравномерного износа

Угол поворачивания φ, град	Число рабочих положений n	Коэффициент ϕ	
		$v_{ср} \approx v_{кр}$	$v_{кр} < v_{ср} < 2v_{кр}$
60	6	0,4	0,35—0,30
90	4	0,5	0,45—0,35
120	3	0,6	0,55—0,45
180	2	0,7	0,65—0,55

Таблица 5-2

Значения коэффициента k_β для крупнокускового шлака

Направление потока	Угол наклона пульпопровода β, град								
	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90
Нисходящий	1,0—1,4	1,4—1,7	1,7—2,0	2,0—2,2	2,2—1,8	1,8—1,7	1,7—1,5	1,5—1,0	1,0—0,5
Восходящий	1,0	1,1	1,0	1,0	0,8	0,6	0,55	0,5	0,4

4. Параметры неравномерного износа стенок при транспортировании крупнокускового шлака следует определять по данным табл. 5-1 (вместо табл. 2).

5. Для учета влияния угла наклона на срок службы трубопровода следует пользоваться данными табл. 5-2 (взамен табл. 6).

Примеры расчета гидроабразивного износа пульпопроводов

Пример 1. Требуется определить расчетную толщину стенок труб и ориентировочный срок службы пульпопровода проектируемой ТЭС для следующих условий: сжигаемое топливо — уголь Канско-Ачинского месторождения, удаление золошлаковых материалов совместное (жидкий шлак+зола); средняя агрегатная плотность золошлака 2,5 г/см^3; скорость транспортирования смеси 1,95 м/с; критическая скорость 1,70 м/с; концентрация твердого в пульпе 5,5%; крупность частиц $d_{ср} = 3{,}42$ мм; диаметр трубопровода 0,5 м; расстояние от багерной до золоотвала 4,5 км ($L = 4{,}5$ км); рельеф плоский ($\beta = 0°$). Материал трубы — малоуглеродистая сталь 20; предлагается одновременная эксплуатация 4 линий трубопроводов, из них I резервная, находящаяся обычно в консервации. Общий срок эксплуатации золоотвала, т. е. и золошлакопроводов, 25 лет; давление багерного насоса 0,5 МПа.

Время работы пульпопровода при износе толщины стенки в среднем на 1 мм определяется по зависимости (2), раздел 2.

За аналоговую принимаем параметры транспортирования при максимальной абразивности материала ($k_а = 0{,}8$) по табл. 1.

Подстановка соответствующих значений дает:

$$t_1 = \frac{5}{8}\cdot\frac{2{,}4}{2{,}5}\cdot\frac{0{,}8}{0{,}8}\cdot\frac{1{,}05}{1{,}0}\cdot\frac{2{,}6}{2{,}5}\cdot\left(\frac{1{,}8}{1{,}95}\right)^{2{,}5}\cdot\left(\frac{0{,}05}{0{,}055}\right)^{0{,}65}\cdot\left(\frac{3{,}42}{3{,}42}\right)^{0{,}9}\cdot\left(\frac{0{,}4}{0{,}5}\right)^{0{,}3} = 0{,}47 \text{ год/мм},$$

где $T_{ан} = 5$ лет; $k_а = k_{ан} = 0{,}8$; $n_{ан}\psi_{ан} = 2{,}5$; $k_{и.ан} = 1$; $\rho_{ан} = 2{,}6$ г/см^3; $v_{ан} = 1{,}8$ м/с; $S_{ан} = 0{,}05$; $d_{ан} = 3{,}42$ мм; $D_{ан} = 0{,}4$ м; $\delta_{и.ан} = 8$ мм — определены по табл. 6-1; $k_и = 1{,}05$ — по табл. 7; $n\psi = 2{,}4$ по табл. 2 с учетом расчетов по формуле (3);

$$\varphi = 980\sqrt{\frac{2{,}6}{2{,}5}}\cdot 0{,}055\cdot\frac{1{,}95}{1{,}7}e^{-3{,}6\cdot 0{,}055} = 52°,$$

Расчет величины t_1 можно было проводить по более упрощенной формуле (4):

$$t_1 = \frac{0{,}075\cdot 2{,}4\cdot 1{,}05}{0{,}8\cdot 1{,}95^{2{,}5}\cdot 0{,}055^{0{,}65}\cdot 0{,}5^{0{,}3}} = 0{,}39 \frac{\text{год}}{\text{мм}}.$$

С учетом заданных условий эксплуатации, согласно формулам (1) и (6) получаем:

$$\delta_ф = 1\cdot\frac{25}{0{,}47}(1 + 0{,}1\cdot 2) = 64 \text{ мм}.$$

Округляем до кратного числа стандартной толщины:

$$\delta_{ф.ст} = \frac{64}{5} = 14 \text{ мм}.$$

Фактический срок службы трубопровода, с учетом резервной линии определяется по зависимости (7) с учетом (9):

$$T_{ф.р} = (14 - 2)\cdot 0{,}47\cdot\frac{4}{3} = 7{,}5 \text{ лет}.$$

Время эксплуатации трубопровода до первого (и следующего) поворачивания определяется по зависимости:

$$T_{\text{пр}} = \frac{7{,}5}{4} \approx 2 \text{ года}.$$

Пример 2. Требуется определить расчетную толщину стенок труб и ориентировочный срок службы пульпопровода, в связи с заполнением золоотвала и строительством нового золоотвала на расстоянии 20 км от ТЭС. Условия работы «старого» принимаемого за аналог трубопровода следующие: $v_{\text{ан.ср}} = 1{,}2$; $v_{\text{кр}} = 1{,}2$ м/с; $D_{\text{ан}} = 0{,}35$ м; $d_{\text{ан}} = 0{,}07$ мм; $\rho_{\text{т.ан}} = 2{,}6$ г/см^3; $S_{\text{ан.ср}} = 0{,}08$; $\delta_{\text{и.ан}} = 10$ мм; $n_{\text{ан}} = 4$; $\psi_{\text{ан}} = 0{,}6$ ($\varphi_{\text{макс}} = 70°$); $k_{\text{и.ан}} = 1{,}0$; $k_{\text{а.ан}} = 0{,}4$ (зола воркутинского угля по табл. 3); $n_{\Sigma\text{ан}} = 3$; $n_{\text{р.ан}} = 3$; $\beta_{\text{ан}} = 0°$; $L_{\text{ан}} = 4$ км; $T_{\text{ан}} = 9$ лет.

Как было принято, в заданных условиях $L = 20$ км. При этом на расстоянии 5 км, начиная с 10-го километра, трубопровод уложен с уклоном $\beta = 30°$.

Рассматриваются два варианта: 1) применение труб диаметром 0,35 м (как и в исходном варианте); 2) применение труб диаметром 0,45 м.

При первом варианте все параметры транспортирования остаются неизменными, поэтому срок службы начального горизонтального участка труб на длине 0—5 км остается неизменным, т. е. $T_{(0-5)} = 9$ лет.

Срок службы трубопроводов на участках 5—10, 10—15 ($\beta = 30°$) и 15—20 км рассчитывается по формуле (5), с учетом данных табл. 5 и 6. Результаты расчетов приведены в табл. 6-1.

Таблица 6-1

Срок службы трубопровода

№ участка	Расстояние транспортирования ($L_n - L_{n-1}$), км	k_β	k_L	T, год
1	0—5	1	1	9
2	5—10	1	1,25	11,2
3	10—15	0,7	1,45	9
4	15—20	1	1,56	14
				$T_{\text{ср}} = 10{,}75$

Таблица 6-2

Срок службы трубопровода

№ участка	Расстояние транспортирования ($L_n - L_{n-1}$), км	k_β	k_L	T, год
1	0—5	1	1	17,25 лет
2	5—10	1	1,25	21,5 лет
3	10—15	0,7	1,45	17,5 лет
4	15—20	1	1,56	26,9 лет
				$T_{\text{ср}} = 20{,}79$

Для второго варианта при неизменной часовой производительности системы, т. е. при $Q = \frac{\pi D_4}{4} \cdot v_{\text{ср}} \cdot S_{\text{ср}} = \text{const}$, получаем, что если $D = 0{,}45$ м, $v_{\text{ср}} = 1{,}2\, v_{\text{кр}} = 1{,}30$ м/с; $S_{\text{ср}} = 0{,}07$ из трех линий одновременно эксплуатируются 2, а третья находится в резерве и соответственно:

$$t_{1(0-5)} = \frac{9}{10} \cdot \frac{0{,}4}{0{\cdot}4} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{4{,}06}{4{,}06} \cdot \frac{2{,}6}{2{,}6} \cdot \left(\frac{1{,}3}{1{,}2}\right)^{2{,}5} \cdot \left(\frac{0{,}08}{0{,}07}\right)^{0{,}65} \cdot \left(\frac{0{,}07}{0{,}07}\right)^{0{,}9} \cdot \left(\frac{0{,}35}{0{,}45}\right)^{0{,}3} \approx 1{,}15 \frac{\text{год}}{\text{мм}}.$$

Умножив на стандартную толщину аналогового трубопровода $\delta = 10$ мм, получаем:

$$T_{\phi(0-5)} = 1{,}1 \cdot 10 = 11{,}5 \text{ лет}.$$

С учетом резервной линии

$$T_{\text{ф.р}(0-5)} = \frac{3}{2} \cdot 11{,}5 = 17{,}25 \text{ лет}.$$

Результаты расчета срока службы трубопровода с учетом угла наклона и расстояния транспортирования сведены в табл. 6-2.

Стоимость труб диаметром 0,45 м в среднем в 1,4 раза дороже, чем труб диаметром 0,35 м, а средний срок службы получается выше в 1,9 раза, что позволяет отдать предпочтение второму варианту. Окончательное решение следует принимать после уточненных технико-экономических расчетов.

Остальные требуемые параметры (стандартная толщина труб и соответственно ожидаемый фактический срок службы, а также время работы до очередного профилактического поворачивания) рассчитываются по предлагаемой методике.

Пример 3. Требуется запроектировать систему для удаления жидкого шлака. Рассматриваются два варианта: 1) с предварительным измельчением шлака; 2) без предварительного измельчения (при отсутствии дробилки). Ожидаемая средневзвешенная крупность частиц при первом варианте $d_{ср} = 7{,}5$ мм; при втором — 12,0 мм.

Параметры транспортирования $v_{ср\,1} = 1{,}8$ м/с; $v_{ср\,2} = 2{,}45$ м/с; $D_1 = 0{,}35$ м; $D_2 = 0{,}30$ м; $S_{ср\,1} = S_{ср\,2} = 0{,}035$; $\rho_{т\,1} = \rho_{т\,2} = 2{,}6$ т/см^3; $\delta_{и\,1} = \delta_{и\,2} = 10$ мм; $n_1 = 0{,}4$; $\psi_1 = 0{,}6$; $k_и = 1$; $k_{а\,1} = k_{а\,2} = 1{,}1$.

По формуле (2) с учетом данных табл. 1 и рис. 5-1 рассчитываем:

$$t_1 = \frac{3{,}5}{10}\cdot\frac{1{,}1}{1{,}1}\cdot\frac{1}{1}\cdot\frac{4\cdot 0{,}6}{4\cdot 0{,}6}\cdot\frac{2{,}6}{2{,}6}\cdot\left(\frac{1{,}8}{1{,}8}\right)^{q_v}\cdot\left(\frac{0{,}035}{0{,}035}\right)^{0{,}65}\cdot\left(\frac{8{,}2}{7{,}5}\right)^{q_d}\cdot\left(\frac{0{,}035}{0{,}035}\right)^{q_a} = 0{,}38\ \frac{\text{год}}{\text{мм}},$$

где значения сомножителей

$$\left(\frac{1{,}8}{1{,}8}\right)^{q_v} = 1;\quad \left(\frac{8{,}2}{7{,}5}\right)^{q_d} = 1{,}08;\quad \left(\frac{0{,}035}{0{,}035}\right)^{q_a} = 1,$$

определены по графикам, приведенным на рис. 5-1.

Для второго варианта:

$$\left(\frac{2{,}45}{1{,}9}\right)^{q_v} = 0{,}82;\quad \left(\frac{8{,}2}{12}\right)^{q_d} = 0{,}75;\quad \left(\frac{0{,}35}{0{,}3}\right)^{q_1} = 0{,}85,$$

и соответственно:

$$t_1 = \frac{3{,}5}{10}\cdot\frac{1{,}1}{1{,}1}\cdot\frac{1}{1}\cdot\frac{4\cdot 0{,}6}{4\cdot 0{,}6}\cdot\frac{2{,}6}{2{,}6}\cdot 0{,}82\cdot\left(\frac{0{,}035}{0{,}035}\right)^{0{,}65}\cdot 0{,}75\cdot 0{,}85 = 0{,}18\ \text{год/мм}.$$

Таким образом, при отсутствии дробилок срок службы трубопроводов в среднем (при одинаковой толщине стенок труб) в 2,2 раза ниже, чем при предварительном дроблении транспортируемого жидкого шлака, что дает возможность утверждать: транспортирование продуктов сгорания ТЭС без предварительного их дробления крайне нежелательно и практически недопустимо.

В дальнейшем расчеты продолжаются только для первого варианта в соответствии с методикой.

Приложение 7

ДАННЫЕ О СВОЙСТВАХ ТРУБ ИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ

1. Хорошие эксплуатационные свойства в условиях гидроабразивного износа показывают биметаллические трубы. Они состоят из внутренней хрупкой трубы из броневых или закаленных сталей (например, Х18, Х12) и внешней оболочки из мягкой стали (Ст. 2, Ст. 3) толщиной 3—5 мм. Износостойкость внутренних слоев в 3—6 раз выше, чем у обычных сталей.

Стоимость биметаллических труб около 600 руб/т (против 180 руб/т для обычной стальной трубы), что объясняется малыми масштабами их производства (данные на 1978 г.).

Биметаллические трубы выпускают два трубопрокатных завода: Днепропетровский — диаметром 219 и 325 мм; Челябинский — диаметром 400—550 мм.

Трубы поставляются плетями длиной 10 м. Их можно резать только с помощью специальных резаков или электросваркой, с последующей обточкой концов на станке.

2. Научно-исследовательским институтом трубной промышленности (г. Челябинск) совместно с трестом «Уралсибгидромеханизация» разработан новый способ получения износостойкого слоя на внутренней поверхности длинномерных труб диаметром до 426 мм посредством ее упрочнения методом высокотемпературной газовой цементации. Производственные испытания этих труб показали, что их износостойкость в среднем увеличивается в два раза.

По данным НИИ трубной промышленности применение труб с износостойким внутренним слоем позволит экономить на каждом километре пульпопровода 13—15 тыс. руб.

3. В последние годы наряду с изготовлением труб из высокопрочных дефицитных металлов и сплавов большое применение находят трубы, футерованные каменным (базальтовым) литьем и различными полимерами.

Каменное литье (например базальт, диабаз и др.) в форме цилиндрических вкладышей длиной 0,5—1,0 м применяют для футеровки тонкостенных стальных труб.

В табл. 7-1 приведены все основные параметры вкладышей, выпускаемых Кондопожским заводом камнелитых изделий и минерального сырья. Вкладыши выпускаются с диаметром условного прохода от 150 до 400 мм, длиной 1,0 м по ТУ 21-7-56-72.

Срок службы стальных труб, футерованных каменным литьем, используемых для удаления золы и шлака на электростанциях, увеличивается в среднем в 5—10 раз.

Таблица 7-1

Основные параметры камнелитных вкладышей

Диаметр условного прохода, мм	Наружный диаметр, мм	Номинальная толщина стенки, мм	Теоретическая масса 1 м трубы, кг	Размеры стальной трубы, футеруемой каменным литьем	
				наружный диаметр, мм	рекомендуемая толщина стенки, мм
150	190	25	39	219	3
200	245	25	52	273	3—4
250	295	25	64	325	3—5
300	345	25	75	377	4—5
350	393	25	87	426	4—6
400	446	25	99	480	4—6

Кондопожский завод также выпускает втулки из каменного литья с косым срезом торцов, предназначенные для футеровки поворотных колен трубопроводов. Завод также гарантирует из-

готовление стальных труб с камнелитой внутренней облицовкой с расчетным давлением рабочей среды до 0,8 МПа (8 атм) при условии поставки заказчиком заводу металлических труб (или соответствующего количества металла).

Отпускные оптовые цены на камнелитые изделия массового производства Кондопожского завода (по прейскуранту № 06-11-01 и дополнениям к нему) приведены в табл. 7-2.

Таблица 7-2

Оптовые цены на изделия из каменного литья

Наименование изделия	ТУ	Наружный диаметр, мм	Оптовая цена, руб/*m*
Вкладыши камнелитые	21-7-56-72	190—445	120,00
Втулки с косым срезом торцов	21-23-12-40-70	125—250	175,00

Распределение фондов на камнелитые трубы производит «Союзглавстройматериалы».

Всесоюзным Государственным трестом «Оргрэс» (ныне «Союзтехэнерго») разработаны следующие методы футеровки стальных труб втулками из каменного литья: а) закладка камнелитых втулок в новые стальные трубы с помощью шеста длиной 8—10 м с обеих сторон участка; б) закладка камнелитых втулок в уже эксплуатировавшиеся трубы прямо на трассе с помощью лебедки, через вырезанные в трубах окна на расстоянии 10—15 м друг от друга.

В дальнейшем независимо от метода укладки втулок желательно производить заполнение зазоров цементным раствором, что на 10% уменьшает гидравлические сопротивления и увеличивает предел выдерживаемого давления до 2,5 МПа (25 атм) по сравнению со способом футеровки без цементного раствора, при одновременном увеличении трудозатрат в два раза (по данным «Союзтехэнерго»).

В настоящее время для повышения прочности камнелитые втулки изготавливаются армированными металлической проволокой.

Следует учесть и некоторые недостатки труб, футерованных каменным литьем: а) повышенные (в 1,7—2,0 раза) гидравлические сопротивления по сравнению с металлическими трубами; б) высокая стоимость; в) повышенная хрупкость: г) трудность монтажа; д) весьма низкая точность отливок из камня, способствующая образованию уступов и закупорок труб.

Трубы из каменного литья изготавливаются на следующих заводах:

1) Кондопожском заводе камнелитых изделий и минерального сырья. (Карельское ПО «Карелстройматериалы» Мини-

стерства промышленности строительных материалов РСФСР; г. Кондопога Карельской АССР);

2) Криворожском рудо-ремонтном заводе горнообогатительного оборудования (Минчермет СССР, г. Кривой Рог Украинской ССР);

3) Первоуральском заводе горного оборудования (МГИ РСФСР, г. Первоуральск Свердловской обл.).

4. Трубы из термостойкого стекла, защищенные металлической оболочкой типа СИМ («Стекло и металл»), устойчивы к химическим воздействиям, хорошо герметизируются, выдерживают повышенные давления (в том числе и динамические нагрузки). Срок службы труб СИМ, по данным института «УкрНИИУглеобогащение» (г. Ворошиловград), в напорных системах по сравнению с трубами из углеродистой стали при транспортировании антрацитовых шламов и магнетитовых суспензий выше в 10—12 раз.

Серийное производство труб СИМ освоено: Моспинским РМЗ ПО «Донецкуглеобогащение» (D=200 мм) и Ворошиловградским РМЗ ПО «Ворошиловградуглеобогащение» (D = =150 мм). Стоимость трубы СИМ 21—22 руб/м.

5. Хорошим материалом для изготовления внутренних защитных слоев гидротранспортных трубопроводов является полиуретан, который обладает не только высоким сопротивлением абразивному воздействию перекачиваемого продукта, но и поглощает ударные колебания. Кроме того, полиуретан химически устойчив к маслам, растворителям, разбавленным кислотам и щелочам. Полиуретановая прокладка наносится на внутренние стенки труб центробежным способом, на зачищенную поверхность, покрытую связующим компонентом. Особенно высокой относительной износостойкостью характеризуется СКУПФЛ-74, который по своим свойствам близок к наиболее распространенной за рубежом марке ПУЭ — «Адипрен», выпускаемой фирмами США и Англии.

В настоящее время в СКТБ «Энергопромполимер» (Минэнерго СССР) разработан способ получения бипластмассовых труб с наружным несущим и внутренним износостойкими слоями. Связь между полиуретановой футеровкой и наружным слоем в случае применения полиоглефинов или других неполярных материалов достигается за счет разницы коэффициентов линейного расширения. Центробежное литье и твердение полиуретанов в полиэтиленовой трубе осуществляется при повышенной температуре. Охлаждение полученной бипластмассовой трубы приводит к термообжатию полиуретановой футеровки наружным полиэтиленовым слоем.

Результаты опытов по определению относительной износостойкости СКУ ПФЛ-74 в паре с различными золошлаковыми материалами приведены в табл. 7-3.

Таблица 7-3

Износостойкость ПУЭ СКУ-ПФЛ-74

Абразивный материал	Износостойкость		Вид изнашивания
	массовая	линейная	
Эталонный песок	44,5	7,4	Гидроабразивный
	50	8,5	Гидроабразивно-коррозионный
Твердый шлак	44	7,3	Гидроабразивный
	55	9,3	Гидроабразивно-коррозионный
Жидкий шлак	34,5	5,7	Гидроабразивный
	34,6	5,7	Гидроабразивно-коррозионный
Зола	42	6,9	Гидроабразивный
	56	9,3	Гидроабразивно-коррозионный
Золошлак	37	6,2	Гидроабразивный
	60	10	Гидроабразивно-коррозионный

Приведенные затраты на сооружение бипластмассовых труб с внутренним слоем из полиуретана толщиной 7 мм, с наружной оболочкой из полиэтилена составляют 85 руб на метр (по данным СКТБ «Энергопромполимер»).

6. Иногда для внутренней изоляции гидротранспортных труб (в случаях, когда преобладающим является коррозионный износ) эффективным может оказаться такой сравнительно дешевый материал, каким является полиэтилен (например, для ТЭС, сжигающих экибастузский уголь и оборудованных мокрыми золоуловителями).

В футерованных полиэтиленом высокой плотности трубах всю эксплуатационную и конструкционную нагрузку несет стальная оболочка, полиэтилен же защищает ее от износа (в основном коррозионного). Применение труб, футерованных полиэтиленом, рекомендуется прежде всего для перекачки жидкостей (например, оборотных вод).

7. В настоящее время освоено промышленное производство эмалированных труб для нужд нефтяной и газовой, а также химической промышленности и мелиорации (цехи эмалирования в г. Краснокамске Пермской обл.; г. Шевченко Казахской ССР; г. Калуш Ивано-Франковской обл. — трубы диаметром до 300 мм; г. Смелы, Черкасской обл. — трубы диаметром 200 мм).

По данным института ИОТТ (г. Люберцы, Московской обл.), однократное эмалирование стальных труб покрытием типа 13-III эквивалентно увеличению толщины их стенок на 7—8 мм и дает эффект от экономии металла в среднем 10—12 руб. на каждый метр трубы.

Применение труб с эмалевыми покрытиями рекомендуется для перекачки только золовой пульпы, так как из-за высокой хрупкости эмали могут легко «отлущиваться» при ударах даже небольших кусков шлака, что может привести к закупорке трубопровода.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО АВАРИЙНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПУЛЬПОПРОВОДОВ

1. С целью увеличения долговечности пульпопроводов в производственных условиях обычно применяют профилактическое поворачивание труб вокруг продольной оси на определенный угол. При поворачивании труб достигается сравнительно равномерное изнашивание стенок труб и полное использование ресурса их металла.

Профилактическое поворачивание оказывается экономически целесообразным только при своевременном выполнении и под оптимальным углом. При выборе угла профилактического поворачивания и момента для поворота необходимо учитывать неравномерность распределения износа стенок трубопроводов по окружности.

2. Для разработки научно обоснованных рекомендаций по проведению планово-предупредительных, профилактических и восстановительных работ наиболее целесообразным оказывается осуществление непрерывного контроля за состоянием труб с помощью специальных экспериментальных участков труб.

3. Применение экспериментальных участков труб позволяет получить информацию о характере неравномерного износа. Для обеспечения непрерывного контроля состояния труб могут быть использованы датчик износа труб (ДИТ) или другие аналогичные устройства.

4. На рис. 8-1 приведено принципиальное устройство рекомендуемого датчика износа. В канавке на наружной поверхности нижней, боковой и верхней стенок изнашиваемого трубопровода *1*, охватываемого втулкой *2*, впрессован патрубок *3* из диэлектрического материала с уплотнением *4*.

Патрубок прижимается плотно к изнашиваемой поверхности посредством пробки *5*. В пробке и патрубке *3*, а также в диэлектрической среде *6* впрессован иглообразный электрод *7*. Замыкание электрической цепи фиксирует сигнальная лампа *8*, питающаяся от источника тока *9*.

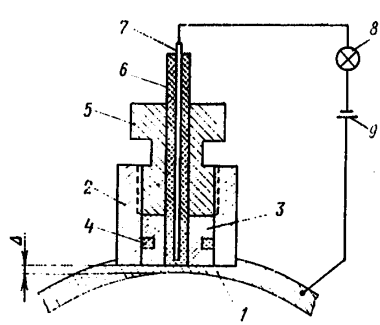


Рис. 8-1. Датчик износа труб (ДИТ).

Устройство работает следующим образом. Сквозное разрушение стенки трубопровода фиксируется иглообразным электродом, который в момент разрушения дает соответствующий сигнал, при этом засекается продолжительность времени до

разрушения. Зная эту продолжительность для нижней, боковой и верхней стенок в отдельности, легко определяются параметры неравномерного износа и перспективе, в зависимости от объема транспортируемого абразивного материала. Патрубок *3* плотно прилегает к изнашиваемой поверхности, что обеспечивается пробкой 5. Это позволяет использовать ДИТ на любом участке трубопровода независимо от рабочего давления. Этому способствует ничтожно малая площадь иглообразного электрода, дающего сигнал при сквозном разрушении утоненной стенки. В то же время компактность и простота изготовления позволяет использовать устройство в любых практически возможных условиях (особо рекомендуется для труб большого диаметра $D \geqslant 600$ мм).

Размещение электрода *7* в диэлектрической среде, предотвращает ложную сигнализацию.

5. В начале эксплуатации испытуемый экспериментальный трубопровод с устройством для контроля абразивного износа труб монтируют на магистрали.

При обычных режимах транспортирования из-за гидроабразивного износа в первую очередь сквозное разрушение произойдет в стенке нижней полости. Этот момент фиксируется соответствующим индикатором через электрод *7*. В дальнейшем, после определенного времени эксплуатации разрушаются сначала стенки боковых полостей, а в конце — верхней. Как и в первом случае, момент сквозного разрушения фиксируется соответствующими индикаторами. Зная продолжительность разрушения разных стенок (нижней, боковой и верхней в отдельности), легко можно установить пропускную способность трубы на 1 мм износа ее нижней стенки (Q_1), время работы трубы до износа нижней стенки на 1 мм (T_1) и коэффициенты неравномерного износа стенок трубы по окружности (ψ):

$$Q_1 = \frac{A \cdot t_{\text{ут. н}}}{\delta_{\text{ут. н}}}, \qquad T_1 = \frac{t_{\text{ут. н}}}{\delta_{\text{ут. н}}},$$

$$\psi_{60} = \frac{1}{1 + \frac{6t_{\text{н}}}{2t_{\text{б}} + t_{\text{н}}} + \frac{6t_{\text{н}}}{2t_{\text{б}} + t_{\text{в}}} + \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{в}}}},$$

$$\psi_{90} = \frac{t_{\text{б}} + t_{\text{в}}}{t_{\text{б}}t_{\text{в}} + 2t_{\text{н}}t_{\text{в}} + t_{\text{н}}t_{\text{б}}},$$

$$\psi_{120} = \frac{2t_{\text{б}} + t_{\text{в}}}{2t_{\text{б}} + t_{\text{в}} + 6t_{\text{н}}},$$

$$\psi_{180} = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{в}} + t_{\text{н}}},$$

где A — годовая производительность системы по твердому, т/год;
$t_{\text{ут.н}}$ — интервал времени, необходимый для утончения нижней стенки трубы на 1 мм, год;

$t_н'$, $t_б$, $t_в$ — интервалы времени, необходимые для сквозного разрушения в 1 мм толщины стенки соответственно в нижней, боковой и верхней точках окружности, год;

$\delta_{ут.н}$ — толщина стенки в области нижнего утончения, мм.

6. С целью выбора оптимального угла профилактического поворачивания, обуславливающего наименьшие годовые капитальные и эксплуатационные затраты, необходимо проведение соответствующих экономических расчетов.

Общие годовые затраты, отнесенные на 1 метр трубы (руб/м·год), вычисляются по зависимости:

$$C = \frac{C_1 + \sum_{i=1}^{m} C_i (n_i - 1)}{\sum_{i=1}^{m} T_i L_i},$$

где C_1 — капитальные затраты (стоимость трубопроводов с учетом транспортировки и монтажа), руб;

C_i — стоимость одного поворачивания i-го участка трубопровода вокруг продольной оси, руб;

m — количество поворачиваемых участков трубопровода;

n_i — число рабочих положений i-го участка трубопровода;

L_i — длина i-го участка трубопровода, м;

T_i — срок службы i-го участка пульпопровода, при принятом угле профилактического поворачивания, год.

Величина T_i определяется по зависимости:

$$T_i = T_1 (\delta_{ф.ст} - \delta_{мин}) \cdot n_i \psi_i,$$

где ψ_i — коэффициент неравномерного износа при n поворачиваниях;

$\delta_{ф.ст}$ — стандартная толщина стенки трубопровода, мм;

$\delta_{мин}$ — минимально допустимая толщина стенки, мм.

Сравнение рассчитанных вычисленных значений C для разных углов профилактического поворачивания позволяет выбрать оптимальный угол профилактического поворачивания, с наименьшими годовыми затратами, отнесенными на 1 метр трубы.

7. После выбора оптимального угла профилактического поворачивания, с целью осуществления непрерывного контроля за состоянием трубопроводов и установления допустимого линейного износа нижней стенки трубы перед очередным поворачиванием ($\delta_{доп}$), можно использовать экспериментальный трубопровод (вмонтированный ДИТ). Для этого на основании установленных параметров неравномерности износа стенок трубопровода стенки экспериментального трубопровода в различных сечениях периметра искусственно утончают до различных величин, обратно пропорциональных интенсивности износа труб в различных сечениях, и вмонтируют ДИТ.

Сквозное разрушение утонченной стенки в нижней полости устройства служит сигналом для начала очередного профилактического поворачивания труб на участке магистрали.

Величина утончения для различных точек периметра контрольного патрубка (мм) определяется по зависимости:

$$\delta_{ук} = \delta_{доп}\frac{\delta_y}{\delta_н},$$

где δ_y — линейный износ стенок труб на высоте y от нижней точки, установленный с помощью непосредственных замеров ультразвуковым толщиномером или рассчитанный по формуле

$$\delta_y = kt_н \cdot \frac{t_н}{t_y},$$

при пользовании ДИТ, мм;

k — коэффициент пропорциональности, мм/год;

t_y — интервал времени, необходимый для сквозного разрушения 1 мм толщины стенки на высоте y от нижней точки трубы, год;

$\delta_y = \delta_н$; $\delta_б$; $\delta_в$ — линейный износ стенок труб, соответственно для нижней, боковой и верхней поверхности, мм.

8. Для осуществления оперативного контроля за состоянием эксплуатируемых трубопроводов в промышленных условиях рекомендуется использование переносных ультразвуковых измерителей толщины, выпускаемых серийно заводом «Электроточприбор» (г. Кишинев).

Оперативный контроль состояния труб следует проводить службой ремонта или эксплуатации гидротранспортной системы по установленному графику, и результаты должны фиксироваться в специальных журналах.

Приложение 9

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ ИЗНОСОСТОЙКОГО МАТЕРИАЛА

Расчет экономической эффективности при осуществлении мероприятий для увеличения долговечности эксплуатации оборудования или трубопроводов (например, при замене одного материала другим, более износостойким, проведение профилактического поворачивания труб и т. п.) производится по формуле:

$$Э = (З_1 - З_2) \cdot A_2, \qquad (9\text{-}1)$$

где $Э$ — годовой экономический эффект, руб; $З_1$ и $З_2$ — приведенные затраты на единицу продукции до и после осуществления мероприятий; A_2 — годовой объем производства продукции после осуществления мероприятий.

Приведенные затраты определяются суммой себестоимости и нормативной прибыли:

$$З = C + E_н K, \qquad (9\text{-}2)$$

где C — себестоимость единицы продукции (работы), руб; K — удельные капитальные вложения в производственные фонды, руб; $E_в$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Подставляя значения формулы (10-2) в формулу (10-1), получаем:

$$Э = [(C_1 + E_н K_1) - (C_2 + E_н K_2)] \cdot A_2, \qquad (9\text{-}3)$$

или

$$Э = [(C_1 - C_2) - E_н (K_2 - K_1)] \cdot A_2, \qquad (9\text{-}4)$$

где C_1 и C_2 — себестоимость единицы продукции (работы) до и после проведения мероприятий, руб; K_1 и K_2 — удельные капитальные вложения в производственные фонды до и после проведения мероприятий, руб.

Если капитальные вложения в производственные фонды отсутствуют как до, так и после проведения мероприятий, т. е. $K_1 = K_2 = 0$, то годовой экономический эффект от увеличения долговечности оборудования рассчитывается по зависимости:

$$Э = (C_1 - C_2) \cdot A_2. \qquad (9\text{-}5)$$

Применение предлагаемой методики экономического расчета к случаю повышения долговечности оборудования систем гидрозолоудаления может быть пояснено следующим примером.

Рассматривается вариант замены стальных трубопроводов на бипластмассовые трубы с внутренним слоем из полиуретана с относительной износостойкостью $\varepsilon = 6$. Сооружаются три линии трубопровода длиною $L = 5000$ м каждая. Диаметр труб 400 мм, производительность системы по твердому $Q_т = 50$ м^3/ч. Фактический срок службы стальных трубопроводов при износе толщины стенок на $\delta_и = 7$ мм $T_1 = 3$ года. Начальная толщина стенок труб $\delta_{нач} = 10$ мм.

Расчет экономической эффективности проводится по формуле (9-4).

Себестоимость транспортирования 1 м^3 твердого материала при применении стальных труб составит:

$$C_1 = \frac{C_{ст} \cdot P_{т1} + C_{о1} + C_{э1}}{A_1}, \qquad (9\text{-}6)$$

где $C_{ст} = C_т + C_м + (n-1) \cdot C_{пр} = 14 + 2{,}4 + (3-1) \cdot 2{,}2 = 20{,}8$ руб/м — фактическая стоимость 1 м трубопровода, состоящая из стоимости стальных труб ($C_т$), стоимости монтажа ($C_м$) и профилактического поворачивания $C_{пр}$ вокруг продольной оси на 120° за весь срок службы стальных труб;

$C_{о1}$ — стоимость обслуживания системы за год, руб/год;

$C_{э1}$ — стоимость израсходованной электроэнергии за год, руб/год;

$P_{т1} = \frac{mL}{T_1}$ — приведенный расход стальных труб, отнесенный на один год эксплуатации системы, м/год;

$A_1 = 24 \cdot 350 \cdot Q_т$ — годовая производительность системы по твердому, м^3/год.

Себестоимость транспортирования 1 м^3 твердого материала при использовании бипластмассовых труб составит:

$$C_2 = \frac{C_б \cdot P_{т2} + C_{о2} + C_{э2}}{A_2}, \qquad (9\text{-}7)$$

где $C_б = C_{т2} + C_{о2} + (n-1) \cdot C_{э2} = 85 + 2{,}4 + (3-1) \cdot 2{,}2 = 91{,}6$ руб/м — ориентировочная сметная стоимость 1 м бипластмассового трубопровода с толщиной слоя полиуретана $\delta_{нач} = 7$ мм, состоящая из стоимости труб, стоимости монтажа и профилактического поворачивания (условно принято, что расходы по монтажу и профилактическому поворачиванию для бипластмассовых и стальных труб одинаковы);

$C_{о2}$ — стоимость обслуживания системы за год, руб/год;

$C_{э2}$ — стоимость израсходованной электроэнергии за год, руб/год;

$P_{т2} = \frac{mL}{T_2}$ — приведенный расход бипластмассовых труб в целом за один год эксплуатации системы, м/год;

$T_2 = \varepsilon T_1 \frac{\delta n_2}{\delta n_1}$ — ожидаемый срок службы бипластмассовых труб, руб/год;

$A_2 = 24 \cdot 350 \cdot Q_т$ — годовая производительность системы по твердому, м³/год.

Подставляем в формулу (9-4) $E_н = 0{,}15$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; $K_1 = C_{т1} \cdot P_{т1}$ — приведенные к одному году эксплуатации системы капитальные затраты при применении стальных трубопроводов (руб/год) и $K_2 = C_{т2} \cdot P_{т2}$ — аналогичные капитальные затраты при применении бипластмассовых трубопроводов (руб/год). С учетом того, что в рассматриваемых условиях производительность системы, стоимость обслуживания и израсходованной электроэнергии (приблизительно можно принять, что потери энергии при транспортировании пульпы в гладких стальных и бипластмассовых трубопроводах одинаковы) за год практически остаются неизменными, т. е. $A_1 = A_2$; $C_{01} = C_{02}$: $C_{э1} = C_{э2}$, получаем:

$$\begin{aligned} Э &= (C_{ст} P_{т1} - C_б P_{т2}) - E_н (C_{т2} P_{т2} - C_{т1} P_{т1}) = \\ &= (20{,}8 \cdot 5000 - 91{,}6 \cdot 835) - 0{,}15 (85 \cdot 835 - 14 \cdot 5000) = \\ &= 33850 \text{ руб/год.} \end{aligned}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тененбаум М. М.** Сопротивление абразивному изнашиванию. — М., Машиностроение, 1976. — 271 с.

2. Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций и тепловых сетей / ВНТП 81. — М. 5 Энергия, 1981. — 122 с.

3. **Шкундин Б. М.** Землесосные снаряды. — М.: Энергия, 1973—123 с.

4. **Мелентьев В. А., Нагли Е. З.** Гидрозолоудаление и золоотвалы. — Л.: Энергия, 1968. — 238 с.

5. **Кузнецов П. М.** Удаление шлака и золы на электростанциях. — М.: Энергия, 1970. — 256 с.

6. **Лашевич В. В.** Влияние технологических режимов транспортирования и гидравлических характеристик потока пульпы на износ трубопроводов. — В кн.: Гидромеханизация земляных и открытых горных работ, М., 1968, с. 51—53.

7. **Maratray F.** — Les deuxièmes journées de l'abrasion. — Metallurgite construction mecanigue, 1972, v. 104, 6, p. 241 — 249.

8. **Покровская В. Н.** Пути повышения эффективности гидротранспорта.— М.; Недра, 1972. — 150 с.

9. **Турчанинов С. П.** Долговечность гидротранспортных трубопроводов.— М.: Недра, 1970. — 256 с.

10. **Временная** инструкция за определение срока по службе на напорните пулпопроводы захадротранспорт на отпадъци от обогатителните фабрики при проектранста и експлоатиацата им. София, Нипроруда, 1974. — 58 с.

11. **Пурыгин Н. П., Федорченко В. Е., Руденко В. А.** Износостойкие трубы СИМ — В кн.: Обогащение и переработка углей, № 8, ЦНИЭИУголь, М., 1977, с. 20—23.

12. **Повышение** изностойкости оборудования гидромеханизации и пульпопроводов. — Челябинск: Транспорт, 1980. — 53 с.

13. **Изделия** из каменного литья. Каталог—справочник. — Петрозаводск, 1975. — 40 с.

14. **Рациональные** конструкции пульпопроводов гидрозолоудаления. — Экспресс-информ. / ОРГРЭС, № ПГ-5-71/72, Львов, 1972. — 10 с.

15. **Методика** определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. — М.: Изд. АН СССР, 1977. — 53 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

1. Основные положения 5
   Область применения 5
   Терминология 5
   Классификация систем гидрозолоудаления 6
   Общие требования, предъявляемые к расчету гидроабразивного износа пульпопроводов и багерных насосов 7
2. Расчет срока службы пульпопроводов систем ГЗУ 7
3. Мероприятия по повышению срока службы пульпопроводов . . 13
4. Расчет срока службы рабочих элементов багерных насосов . . . 15
5. Мероприятия по повышению срока службы рабочих элементов багерных насосов 17

Приложение 1. Физические основы методики расчета гидроабразивного износа оборудования систем гидрозолоудаления 18
   1. Общие закономерности процесса 18
   2. Гидроабразивный износ трубопроводов 20
   3. Влияние параметров транспортируемого потока на интенсивность гидроабразивного изнашивания 23

Приложение 2. Физико-механические свойства золы и шлака . . . 28
   1. Гранулометрический состав золы и шлака на ТЭС . . . 28
   2. Выбор расчетного состава золошлакового материала при проектировании 48
   3. Агрегатная плотность золы и шлака 51

Приложение 3. Методика определения относительной абразивности золошлаковых материалов 52

Приложение 4. Прогноз изменения гранулометрического состава шлака при истирании 57

Приложение 5. Расчет параметров износа пульпопроводов при транспортировании крупнокускового (в случае отсутствия дробилок) шлака 66

Приложение 6. Примеры расчета гидроабразивного износа пульпопроводов 67

Приложение 7. Данные о свойствах труб из перспективных износостойких материалов 71

Приложение 8. Методика проведения непрерывного аварийного контроля состояния пульпопроводов 75

Приложение 9. Методика определения экономической эффективности при применении оборудования из износоустойчивого материала . . 78

Список литературы 81

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ГИДРОАБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ПУЛЬПОПРОВОДОВ И НАСОСОВ СИСТЕМ ГИДРОЗОЛОУДАЛЕНИЯ ТЭС

П 09-83
ВНИИГ

Научный редактор *Э. Л. Добкин*
Редактор *Р. Н. Тиназова*
Технический редактор *Т. М. Бовичева*

Сдано в набор 30.12.83. Подписано к печати 30.03.84.
М-34167. Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 2.
Литературная гарнитура. Высокая печать. Печ. л. 5,25.
Уч.-изд. л. 5,05. Кр.-отт. 5,375. Заказ 56. Тираж 980. Цена 75 к.

Типография ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева.
195220 Ленинград, Гжатская ул., 21.

gost.e-ecolog.ru