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

МИНИСТЕРСТВО УГОЛЬНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР
УКРАИНСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-
КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ
ПОДЗЕМНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ
ДОБЫЧИ УГЛЯ
УкрНИИГидроуголь

РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ СИСТЕМ НАПОРНОГО ГИДРОТРАНСПОРТА ЗОЛОШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

П 61-77
ВНИИГ

Ленинград
1977

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.867

В «Рекомендациях по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта золошлаковых материалов» изложена методика гидравлического расчета трубопроводов и методика определения режимов работы насосов гидротранспортных установок для гидрозолоудаления на тепловых электростанциях.

По сравнению с материалами, опубликованными по данному вопросу в информационном сообщении ВНИИГа «Напорный гидротранспорт золы и шлака» (Госэнергоиздат, 1963 г.) настоящие «Рекомендации» существенно изменены и расширены с учетом накопленного опыта исследований.

В соответствии с запросами промышленности значительно увеличен диапазон концентраций и диаметров трубопроводов. Отражены результаты исследований в области работы центробежных насосов на золошлаковых материалах.

Разработан метод определения энергетически наивыгоднейших режимов работы систем гидрозолоудаления, который позволит в дальнейшем перейти к более широкому и единственно правильному методу выбора основных параметров систем золошлакоудаления на основе определения экономически наивыгоднейших режимов их эксплуатации.

«Рекомендации» подготовлены Всесоюзным научно-исследовательским институтом гидротехники им. Б. Е. Веденеева и Институтом УкрНИИГидроуголь.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева (ВНИИГ), 1977

Министерство энергетики и электрификации СССР	**Рекомендации по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта золошлаковых материалов**	П 61-77 ВНИИГ

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящие Рекомендации распространяются на гидравлические расчеты, связанные с выбором режимов гидравлического транспорта золошлаковых материалов, получаемых на ТЭЦ и ТЭС в результате сжигания угля, сланцев или торфа в топках паровых котлов, а также на расчеты, связанные с пересчетом характеристик насосов с воды на гидросмесь.

1.2. Приведенный ниже метод гидравлического расчета построен в соответствии с основными чертами физической модели взвесенесущего потока (см. приложение 1).

1.3. Рекомендации излагают методику гидравлического расчета потоков золошлаковых материалов в незаиленных трубопроводах и обосновывают выбор насоса и расчет рабочих режимов гидротранспортных установок, в зависимости от следующих основных факторов: диаметра D труб, состояния их стенок, создавшегося в процессе работы, скорости движения золошлаковой гидросмеси и ее концентрации и гранулометрического состава транспортируемого золошлакового материала.

1.4. В «Рекомендациях» принята Международная система единиц измерения СИ.

Внесены Всесоюзным научно-*исследовательским институтом* гидротехники им. Б. Е. Веденеева Украинским научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом подземной гидравлической добычи угля „УкрНИИГидроуголь“	*Утверждены ВНИИГом* им. Б. Е. Веденеева решением № 59 от 19 марта 1977 г. и согласованы с Главниипроектом Минэнерго СССР	Срок введения III квартал 1977 г.

1.5. В рекомендациях принята следующая терминология и обозначения:

а) трубопровод (золошлакопровод, пульпопровод) — система труб, по которой транспортируется механическая смесь воды и золошлака: золошлаковая пульпа;

б) золошлаковый (багерный) насос-механизм для подачи золошлаковой пульпы от исходного до конечного пунктов;

в) объемный (Q_w, м³/с) и весовой (G_w, Н/с) расход воды: число кубических метров и ньютонов воды, протекающих в одну секунду через поперечное сечение (F, м²) трубы;

г) объемный (Q_s, м³/с) и весовой (G_s, Н/с) расходы золошлакового материала: число кубических метров золошлака (без учета пор) и число ньютонов золошлака, проходящих в одну секунду через поперечное сечение (F, м²) трубы;

д) объемная концентрация S золошлаковой пульпы — отношение суммы объемов всех твердых частиц, заключенных в данный момент времени в объеме трубы между двумя ее поперечными сечениями, к величине этого объема;

е) весовая консистенция $П$ золошлаковой пульпы — отношение веса грунта в единице объема гидросмеси, протекающей за единицу времени через поперечное сечение трубопровода G_s, к весу воды в этом объеме G_w: $П = G_s/G_w$;

ж) объемная расходная консистенция $C_р$ золошлаковой пульпы — отношение суммы объемов всех движущихся твердых частиц, прошедших в единицу времени через любое поперечное сечение трубы, ко всему объему пульпы, прошедшему то же сечение за то же время;

з) скорость (U, м/с) потока золошлаковой пульпы: средняя по поперечному сечению трубы скорость пульпы:

$$U = \frac{Q}{F} = \frac{Q_w + Q_s}{F}, \text{ м/с} \qquad (1)$$

и) критическая скорость движения золошлаковой пульпы (U_c, м/с) — наименьшая скорость U пульпы, при которой на дне трубы начинает образовываться неподвижный слой выпавших из толщи потока частиц золошлака;

к) связь между концентрацией S и объемной расходной консистенцией $C_р$ зависит от многих факторов и, приближенно, может быть представлена табл. 1.

л) удельный вес гидросмеси (γ, Н/м³): вес единицы объема движущейся гидросмеси:

$$\gamma = \gamma_w [1 + (\Delta - 1)\, s], \qquad (2)$$

где

$$\Delta = \gamma_a : \gamma_w; \qquad (3)$$

γ_w — удельный вес воды; $\gamma_w = 1 \cdot 10^4$ Н/м³;

γ_a — агрегатный удельный вес частиц золошлакового материала:

$$\gamma_a = 2{,}1 \cdot 10^4 \div 3{,}0 \cdot 10^4, \text{ Н/м}^3,$$

Таблица 1

S	C_p			
	$U/U_c = 1{,}0$	1,1	1,2	1,3
0,02	0,011	0,011	0,011	0,011
0,04	0,023	0,023	0,023	0,023
0,05	0,036	0,037	0,037	0,038
0,08	0,051	0,058	0,054	0,055
0,10	0,068	0,070	0,072	0,074
0,12	0,087	0,089	0,092	0,093
0,14	0,107	0,110	0,112	0,114
0,16	0,128	0,131	0,133	0,135
0,18	0,149	0,152	0,155	0,157
0,20	0,172	0,174	0,177	0,179
0,25	0,227	0,230	0,232	0,235
0,30	0,284	0,286	0,288	0,289
0,35	0,339	0,341	0,343	0,344
0,40	0,394	0,395	0,396	0,397
0,45	0,447	0,448	0,448	0,449
0,50	0,499	0,499	0,500	0,500

м) гидравлическая крупность зерен золошлакового материала (W, м/с): скорость равномерного падения одного зерна в безграничном объеме покоящейся воды.

Примечания: 1. Связь между величинами C_p и S (табл. 1) выражается формулами

$$\frac{C_p}{S} = 1 + 4\frac{S}{S_0}\left(\lg\frac{S}{S_0}\right)^3; \qquad (4)$$

$$S_0 = S + \frac{0{,}6 - S}{U/U_c}. \qquad (5)$$

2. Связь между величинами S и Π (пп. ∂ и $е$) выражается формулами:

$$S = \frac{\Pi}{\Pi + \Delta} \qquad (6) \qquad\qquad \Pi = \frac{\Delta S}{(1-S)} \qquad (7)$$

2. ЗОЛОШЛАКОВЫЙ МАТЕРИАЛ

2.1. Общие сведения о физико-механических свойствах золошлаковых материалов тепловых электрических станций СССР приведены в приложении 2.

2.2. Результаты гранулометрического анализа золошлакового материала представляются в виде табл. 2; цифровой пример расчета табл. 2 приведен в приложении 4.

2.3. Каждый неоднородный по крупности зерен d золошлаковый материал при расчете разбивается на две основные группы.

Первая группа $0 < d_i < d_{00}$; $0 < W_{0i} < W_{00}$.

Вторая группа $d_{00} < d_i < d_{макс}$; $W_{00} < W_{0i} < W_{макс}$.

Таблица 2

Порядковый номер i	1	2	3	4	m
Крупность зерен d, мм					
Средняя крупность фракции каждого класса: d_i, мм					
Объемный выход материала каждого класса n_i					
$d_i n_i$					
$\sum_1^m d_i n_i$					
$\sum_1^m n_i$					

m — число фракций, на которые разбивается проба золошлака при анализе.

Граничная между обеими группами крупность d_{00} определяется через соответствующую ей граничную гидравлическую крупность W_{00} и скорость транспортирования U по формуле:

$$W_{00} = U : 30, \text{ м/с}. \tag{8}$$

Связь между крупностью зерен d, (мм) и гидравлической крупностью W, (см/с) дается в табл. 3.

2.4. Для каждой из двух групп взвеси в отдельности могут быть определены средне-взвешенные крупности зерен:

$$d_{01} = \sum_1^{i_{00}} d_i n_i : \sum_1^{i_{00}} n_i. \tag{9}$$

$$d_{02} = \sum_{i_{00}}^{m} d_i n_i : \sum_{i_{00}}^{m} n_i, \tag{10}$$

где i_{00} — порядковый номер класса, соответствующего крупности d_{00}: $1 \leqslant i_{00} < m$.

Средняя — по всему грансоставу — геометрическая крупность золошлака $d_{ср}$ вычисляется по формуле:

$$d_{ср} = \sum_1^m d_i n_i : \sum_1^m n_i. \tag{11}$$

2.5. Принятому в п. 2.3 разделению массы транспортируемого материала на две группы соответствуют две групповые объемные концентрации S_1 и S_2, причем:

$$S_1 + S_2 = S, \tag{12}$$

Таблица 3

d, мм	Гидравлическая крупность W, см/с, при агрегатном удельном весе материала $\gamma_a \cdot 10^4$ Н/м³					
	2,10	2,30	5,50	2,65	2,80	3,00
1	2	3	4	5	6	7
0,005	0,0009	0,0010	0,0012	0,0013	0,0013	0,0016
0.010	0,0034	0,0040	0,0046	0,0051	0,0056	0,0062
0,015	*0,0077*	*0,0091*	*0,0105*	*0,0115*	*0,0127*	*0,0141*
0,020	0,0137	0,0162	0,0186	0,0225	0,0255	0,0250
0,030	0,0307	0,0362	0,0418	0,046	0,0507	0,0562
0,040	0,0547	0,0646	0,0745	0,082	0,090	0,100
0,050	0,0854	0,1009	0,116	0,128	0,141	0,156
0,060	0,123	0,145	0,167	0,184	0,203	0,225
0,070	0,167	0,198	0,228	0,251	0,276	0,306
0,080	0,219	0,259	0,298	0,328	0,340	0,400
0,090	0,276	0,326	0,376	0,414	0,456	0,506
0,100	0,342	0,404	0,465	0,512	0,563	0,625
0,20	1,14	1,37	1,55	1,70	1,86	2,07
0,30	1,88	2,24	2,56	2,82	3,08	3,42
0,40	2,63	3,11	3,58	3,93	4,30	4,77
0,50	3,37	3,99	4,59	5,05	5,02	6,13
0,60	4,12	4,87	5,61	6,17	6,74	7,48
0,70	4,89	5,75	6,62	7,29	7,96	8,83
0,80	5,61	6,63	7,64	8,40	9,18	10,18
0,90	6,35	7,51	8,66	9,52	10,40	11,55
1,0	7,10	8,39	9,67	10,64	11,62	12,90
1,2	8,59	10,16	11,71	12,88	14,05	15,62
1,4	10,07	11,91	13,80	15,11	16,50	18,32
1,6	13,92	15,92	15,12	16,25	17,00	18,75
1,8	14,78	16,04	17,23	18,05	18,75	19,85
2,0	15,55	16,90	18,20	19,00	19,75	20,95
2,2	16,33	17,73	19,07	19,95	20,80	21,95
2,4	17,07	18,52	19,90	20,80	21,75	22,90
2,6	17,75	19,27	20,70	21,65	22,65	23,85
2,8	18,40	20,00	21,50	22,50	23,50	24,80
3,0	19,05	20,70	22,25	23,30	24,35	25,65
3,2	19,70	21,40	23,00	24,05	25,15	26,50
3,4	20,30	22,05	23,70	24,80	25,90	27,30
3,6	20,90	22,70	24,35	25,50	26,65	28,10
3,8	21,45	23,30	25,05	26,20	27,40	28,85
4,0	22,00	23,90	25,70	26,90	28,10	29,60
4,2	22,55	24,50	26,35	27,55	28,80	30,36
4,4	23,10	25,05	26,95	28,20	29,45	31,05
4,6	23,60	25,65	27,55	28,80	30,15	31,75
4,8	24,10	26,10	28,15	29,45	30,80	32,40
5,0	24,60	26,75	28,70	30,05	31,40	33,10
5,2	25,10	27,25	29,25	30,60	32,00	33,75
5,6	26,05	28,30	30,40	31,80	33,25	35,05
5,8	26,50	28,80	30,90	32,35	33,80	35,70
6,0	26,95	29,25	31,45	32,90	34,40	36,25
6,2	27,40	29,75	31,95	33,45	34,95	36,85
6,4	27,85	30,25	32,50	34,00	35,50	37,40
6,6	28,25	30,70	32,95	34,50	36,05	38,00
6,8	28,70	31,20	33,45	35,05	36,60	38,55

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
7,0	29,10	31,60	33,95	35,55	37,20	39,10
7,2	29,50	32,05	34,45	36,05	37,70	39,70
7,4	29,95	32,50	34,90	36,50	38,20	40,25
7,6	30,30	32,90	35,40	37,00	38,70	40,80
7,8	30,70	33,40	35,85	37,50	39,20	41,30
8,0	31,10	33,80	36,30	38,00	39,70	41,80
8,2	31,50	34,20	36,75	38,45	40,20	42,30
8,4	31,90	34,60	37,20	38,90	40,65	42,85
8,6	32,25	35,05	37,70	39,40	41,10	43,40
8,8	32,60	35,45	38,05	39,85	41,60	43,90
9,0	33,00	35,85	38,50	40,25	42,10	44,40
9,2	33,35	36,25	88,90	40,70	42,50	44,85
9,4	33,70	36,85	39,35	41,15	43,00	45,30
9,6	34,05	37,05	39,80	41,60	43,50	45,80
9,8	34,45	37,40	40,20	42,00	43,90	46,30
10,0	34,80	37,80	40,60	42,60	44,40	46,80

При этом

$$S_1 = \sum_{1}^{i_{кр}} n_i S. \qquad (13)$$

$$S_2 = \sum_{i_{кр}}^{m} n_i S. \qquad (14)$$

2.6. Первая группа транспортируемого золошлака образует в смеси с водой суспензию удельного веса

$$\gamma_1 = \gamma_в [1 + (\Delta - 1) S_1], \ Н/м^3. \qquad (15)$$

Вторая группа золошлака транспортируется этой суспензией удельного веса γ_1.

2.7. В случае, если при проектировании золошлакопровода гранулометрический состав подлежащего транспортированию золошлака неизвестен, рекомендуется пользоваться материалами, приведенными в табл. 8, 9 и 10.

3. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И НАПОРА В СИСТЕМАХ НАПОРНОГО ГИДРОТРАНСПОРТА ЗОЛОШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. При расчете гидравлических потерь в системах напорного гидротранспорта золошлаковых материалов считаются заданными следующие величины:

а) физические свойства транспортируемого материала: его агрегатный удельный вес $\gamma_а$ и его гранулометрический состав в виде табл. 2;

б) объемный расход без пор Q_s транспортируемого материала;

в) трасса золошлакопровода;

Искомыми величинами являются:

а) объемный расход Q_w воды;

б) диаметр D трубопровода;

в) концентрация S золошлаковой пульпы;

г) полная мощность N_{ws}, затрачиваемая на транспортирование золошлаковой пульпы;

д) необходимый напор H, соответствующий мощности N_{ws} и объемному расходу Q гидросмеси;

е) характеристики выбранных золошлаковых (багерных) насосов при подаче ими золошлаковой пульпы.

3.2. Расчет проводится для различных вариантов Q_w и D и имеет целью отыскание энергетически наивыгоднейшей комбинации этих величин, соответствующей, при заданном G_s, допустимому в данных условиях минимуму затрачиваемой мощности N_{ws} при непременном и жестком условии обеспечения надежности работы системы «трубопровод — насос» (пропуск крупных кусков шлака, допустимая истираемость стенок труб и т. д.).

3.3. При расчете каждого отдельного варианта режима работы системы золошлакотранспорта задаются различные значения Q_w и D, которые в соединении с заданными в п. 3.1 величинами образуют для каждого варианта группу исходных величин:

$$G_w,\ Q_w,\ G_s,\ Q_s,\ D,\ \gamma_w,\ \gamma_a.$$

3.4. Скорость U золошлаковой пульпы в незаиленной трубе поперечного сечения F согласно п. 1,5, *з* равна:

$$U = 1{,}276\,\frac{Q_w + Q_s}{D^2}. \qquad (16)$$

Скорость U не должна быть ниже критической скорости U_c, определяемой согласно п. 3.17, чем ограничивается выбор возможных вариантов.

3.5. Расходная объемная консистенция C_p золошлаковой пульпы определяется формулой

$$C_p = \frac{Q_s}{Q_w + Q_s}. \qquad (17)$$

3.6. Объемная концентрация S золошлаковой пульпы определяется через C_p по данным табл. 1.

3.7. Полная мощность N_{ws}, затрачиваемая на транспорт золошлаковой пульпы, равна:

$$N_{ws} = N_f + \Sigma N_i, \qquad (18)$$

где N_f — мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения золошлаковой гидросмеси о стенки трубопровода;

ΣN_i — сумма мощностей, затрачиваемых в отдельных звеньях системы на преодоление всех других (кроме трения) видов потерь.

Примечание: Из всех слагающих N_{ws} мощностей наибольшей, обычно, является N_f, вследствие чего иногда именно по N_f можно, приближенно, выбрать энергетически наивыгоднейший режим эксплуатации системы трубопроводного транспорта.

3.8. Напор H, соответствующий найденной мощности N_{ws}, определяется равенством:

$$H = N_{ws} : (G_w + G_s),\ \text{м} \qquad (19)$$

3.9. Мощность N_f, затрачиваемая на преодоление сил трения потока золошлаковой пульпы о стенки трубопровода на всех горизонтальных и мало (меньше 25°) наклоненных к горизонту участках трубопровода длиной l_j и диаметром D_j каждый, вычисляется по формуле:

$$N_f = 10\left(G_w + \frac{G_s}{\Delta}\right)\sum_j\left\{\lambda_j \frac{1}{D_j}\frac{U_j^2}{2g}\left[1 + (\Delta - 1)\,S_1\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{W_{02}^2}{g d_{02}}\left[0{,}04 + 2{,}5\frac{W_{02}}{U_j}\right]S_2\right\} l_j, \text{ Вт} \qquad (20)$$

где, кроме ранее введенных обозначений:

l_j — длина j-го участка трубопровода диаметра D_j;

λ_j — коэффициент гидравлического сопротивления трения, определяемый согласно п. 3.10;

U_j — скорость потока золошлаковой пульпы, определяемая согласно пп. 3.14 и 3.17 для каждого участка трубопровода l_j, D_j в отдельности.

Формула для расчета N_f получена на основании обработки результатов лабораторных и производственных опытов (см. приложение 3) по измерению гидравлических сопротивлений трения потока золошлаковой пульпы; среднеквадратичное отклонение результатов расчета от опытных величин равно 12,3%.

3.10. Коэффициент гидравлического сопротивления трения j-го участка трубопровода диаметра D_j из новых стальных труб, или труб, отшлифованных при гидравлическом транспорте сыпучих материалов, вычисляется по формуле:

$$\lambda_j = \frac{0{,}31}{(\lg \mathrm{Re}_j - 1)^2}, \qquad (21)$$

где

$$\mathrm{Re}_j = \frac{U_j D_j}{\nu_{ws}}, \qquad (22)$$

причем

$$\nu_{ws} = \frac{M}{1 + (\Delta - 1)\,S_1}\,\nu_w, \qquad (23)$$

ν_w — коэффициент кинематической вязкости воды, принимаемый по справочникам; при $t = 20°$С, $\nu = 10^{-6}$ м²/с;

M — коэффициент, определяемый табл. 4.

Таблица 4

Интерполяция результатов опытов для $S_1 = 0 \div 0{,}25$							По материалам опытов					
S_1	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
M	1,0	1,15	1,35	1,62	1,95	2,40	3,16	4,50	7,10	11,20	20,0	44,7

В случае использования стальных труб, эксплуатировавшихся ранее как водопроводные, или труб с коррозированной внутрен-

ней поверхностью, в период времени, пока эти трубы не отшлифовались транспортируемым золошлаковым материалом, коэффициент λ_j, вычисляется по формуле:

$$\lambda_j = 0{,}24\left[\frac{1{,}9\cdot 10^{-6}}{D_j} + \frac{1}{\mathrm{Re}_j}\right]^{0.226}. \qquad (24)$$

В случае использования стальных труб, эксплуатировавшихся ранее для транспорта золы и шлака и могущих быть покрытыми изнутри слоем твердых отложений или в случае, если эти отложения подверглись удалению механическим способом, коэффициент их гидравлического сопротивления будет в несколько раз больше рассчитанного по формулам п. 3.10. Например, при сжигании топлив первой группы (по классификации ВТИ) в проточных системах ГЗУ, и при сжигании топлив первой группы (по классификации ВТИ) и поступлении в зумпф багерных насосов оборотной системы ГЗУ стоков других цехов электростанции в объеме не менее 10% циркулирующего в системе расхода на внутренней поверхности труб образуется слой нерастворимых осадков. Коэффициент λ_j в этих случаях должен быть увеличен в два раза по сравнению с рассчетным.

При использовании труб, облицованных базальтовыми лотками, коэффициент λ_j должен быть увеличен на 30% по сравнению с рассчетным.

3.11. Для трубопроводов, образованных трубами одного и того же диаметра D, знак суммы в формуле п. 3.9, естественно, отпадает.

3.12. Вычисление мощностей N_i, затрачиваемых на преодоление иных, кроме гидравлического трения, потерь, производится по формулам:

а) мощность N_1, затрачиваемая на преодоление уклона, образованного разностью отметок выходного и входного сечений наклоненного к горизонту участка трубы:

$$N_1 = (G_w + G_s)\sum_k l_k \sin\theta_k, \qquad (25)$$

где l_k и θ_k — длина и угол наклона к горизонту k-го участка трубопровода; угол $\theta_k > 0$ на участках подъема пульпы; угол $\theta_k < 0$ на участках движения пульпы вниз;

k — порядковый номер участка трубопровода.

б) мощность N_2, затрачиваемая на преодоление местных сопротивлений:

$$N_2 = \left(G_w + \frac{G_s}{\Delta}\right)\sum_m (\zeta_{ws})_m \frac{U_m^2}{2g}, \qquad (26)$$

где m — порядковый номер местного сопротивления;

$(\zeta_{ws})_m$ — коэффициент потерь, аналогичный коэффициенту Вайсбаха, но отличный от него количественно, вследствие наличия в потоке частиц взвеси.

Приближенно, особенно для водозольной пульпы, можно считать:

$$\zeta_{ws} = [1 + (\Delta - 1)\,S]\,\zeta. \tag{27}$$

в) мощность N_3, затрачиваемая на преодоление гидравлических сопротивлений во входном в трубу сечении и на создание скоростного напора при всасывании золошлаковой пульпы из емкостей, где эта пульпа находится в покое:

$$N_3 = \left(G_w + \frac{G_c}{\Delta}\right)(1 + \zeta_i)\,\frac{U^2}{2g}, \tag{28}$$

где ζ_i — коэффициент сопротивления на входе, который приближенно может приравниваться единице.

3.13. Мощность N золошлакового (багерного) насоса определяется формулой:

$$N = \frac{N_f + \Sigma N_i}{\eta} = \frac{N_{ws}}{\eta}, \tag{29}$$

где η — коэффициент полезного действия насоса при подаче золошлаковой пульпы.

3.14. Выбор энергетически наивыгоднейшего варианта гидротранспорта, соответствующего допустимому в данных условиях значению $(N_{ws})_{\text{мин}}$, определяется скоростями U, равными или несколько бо́льшими критической скорости U_c; выбор отношения $U : U_c$ зависит от специфики эксплуатации проектируемой электростанции и многих условий, не поддающихся учету в общих Рекомендациях по гидравлическому расчету систем золошлакоудаления; иногда, для обеспечения устойчивой эксплуатации системы принимается: $U = 1{,}1\,U_c$.

В случае трубопровода, составленного из труб различного диаметра, приведенное равенство соблюдается для участков труб наибольшего диаметра.

3.15. При расчетах энергетически наивыгоднейшего режима и соответствующего ему диаметра D труб, следует руководствоваться сортаментами труб, выбирая при этом диаметр, ближайший меньший тому, который получен расчетом.

3.16. Критическая U_c скорость потока золошлаковой пульпы вычисляется по условиям течения пульпы в трубе наибольшего $D_{\text{макс}}$ диаметра из всех труб, составляющих данную гидротранспортную систему.

3.17. Критическая скорость U_c вычисляется по формулам:

для золошлака средней крупности $d_{\text{ср}} \leqslant 2$ мм

$$U_c = 0{,}7\,K_c \Delta^{1/3} \sqrt{gD}; \tag{30}$$

для золошлака крупности $d_{\text{ср}} > 2$ мм.

$$U_c = K_c \Delta^{1/3} \left(1 + \frac{d_{\text{ср}}}{D}\right) \sqrt{gD}, \tag{31}$$

где $\Delta = \gamma_a : \gamma_w$, согласно п. 1.5, л; K_c — множитель, определяемый по графику рис. 1.

Формулы для расчета критических скоростей получены на основании обработки результатов лабораторных и производственных опытов (см. приложение 3) по измерению этих скоростей; среднеквадратичное отклонение расчетных величин от опытных равно 22%.

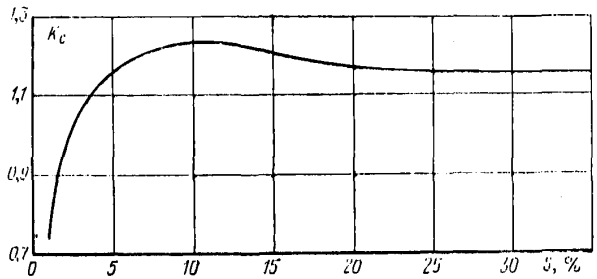

Рис. 1.

3.18. Если кроме весового расхода G золошлака заданы еще какие-либо параметры гидротранспорта, например D или S или U, то число вариантов расчета соответственно сокращается.

3.19. Выбор наивыгоднейшего режима гидротранспорта золошлаковой пульпы определяется сравнением различных вариантов S, D и U, заключенных, в общем, в пределах:

$$S=5\div 30\%;\quad D=150\div 600\ \text{мм};\quad U=1\div 5\ \text{м/с}.$$

4. ВЫБОР НАСОСА И РАСЧЕТ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК

4.1. По вычисленным согласно рекомендациям раздела 3 производительности, напору и мощности гидротранспортной установки производится ориентировочный выбор насоса по каталогам выпускаемых в СССР насосов, содержащим их рабочие характеристики.

4.2. Рабочий режим гидротранспортной установки определяется точкой пересечения напорно-расходных характеристик насоса $H—Q$ и внешней сети $H_{вн}—Q$, построенных в одном масштабе при определенной согласно разделу 3 концентрации гидросмеси.

В случае, если концентрация гидросмеси изменяется во время эксплуатации в пределах $S^{(1)}\div S^{(n)}$, то рабочая зона режимов гидротранспортной установки определяется областью, ограниченной расходно-напорными характеристиками насосов $H^{(1)}—Q^{(1)}$, $H^{(n)}—Q^{(n)}$ и сети $H^{(1)}_{ws}-Q^{(1)}$, $H^{(n)}_{ws}-Q^{(n)}$.

На рис. 2 приведены характеристики насоса и сети при работе на воде $S=0$ и на пульпе $S>0$.

4.3. Приведенные в каталогах и справочниках рабочие характеристики насосов, полученные при испытаниях на воде, должны быть пересчитаны на золошлаковую пульпу заданной концентрации с учетом области промышленного использования насоса по производительности и допустимого снижения напорной характеристики из-за гидроабразивного износа рабочих органов.

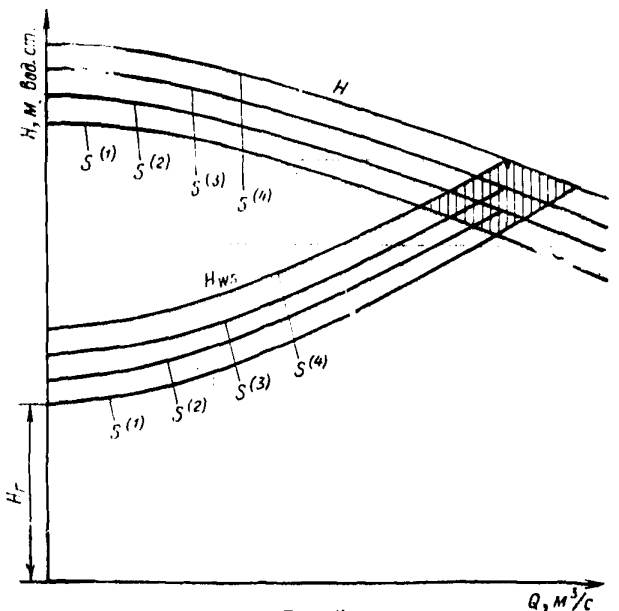

Рис. 2.

4.4. Пересчет напорно-расходной характеристики насоса с воды на золошлаковую пульпу производится по формуле

$$H = k_{\text{н}} [1 + (\Delta - 1) S] H_w, \tag{32}$$

где H, H_w — напоры насоса соответственно на золошлаковой пульпе и в воде при одинаковой производительности, м вод. ст.;

$k_{\text{н}}$ — коэффициент напора, не зависящий от производительности, определяемый по формуле:

$$k_{\text{н}} = 1 - 0{,}6\, S. \tag{33}$$

4.5. Пересчет характеристики мощности насоса с воды на золошлаковую пульпу производится по формуле:

$$N = k_N [1 + (\Delta - 1) S] N_w, \tag{34}$$

где N, N_w — мощность насоса, соответственно на золошлаковой пульпе и в воде при одинаковой производительности, кВт;

k_N — коэффициент мощности, определяемый по табл. 5 в зависимости от концентрации золошлаковой пульпы.

Таблица 5

S	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
k_N	0,999	0,995	0,990	0,983	0,975	0,964	0,954	0,951	0,950	0,949

4.6. Определение КПД насоса, работающего на золошлаковой пульпе, если известен его КПД при работе на воде, производится по формуле:

$$\eta = k_\eta \eta_\omega, \tag{35}$$

где η, η_ω — КПД насоса соответственно на золошлаковой пульпе и воде при одинаковой производительности;

k_η — коэффициент пересчета КПД, не зависящий от производительности и определяемый по следующей формуле (с учетом пп. 4.4, 4.5)

$$k_\eta = \frac{k_H}{k_N}. \tag{36}$$

4.7. Пересчет кавитационной характеристики насоса с воды на золошлаковую пульпу производится по формуле:

$$H_v = H_{vw}[1 + (\Delta - 1)S] - (H_A - H_{нп})(\Delta - 1)S, \tag{37}$$

где H_v и H_{vw} — допустимые вакуумметрические высоты всасывания при работе насоса соответственно на золошлаковой пульпе и воде с одинаковой производительностью, м вод. ст.;

H_A — атмосферное давление, определяемое в зависимости от высоты установки насоса над уровнем моря по табл. 6 (м вод. ст.);

$H_{нп}$ — упругость насыщенного пара несущей среды, м вод. ст. (определяется для воды по табл. 7).

Таблица 6

Высота над уровнем моря, м . .	—600	—200	0	200	500	1000	2000
Нормальное атмосферное давле-давление, м вод. ст.	11,3	10,6	10,3	10,1	9,7	9,2	8,1

Таблица 7

Температура, °С	0	10	20	30	40	50
Упругость насыщенного водяного пара, м. вод. ст.	0,06	0,12	0,24	0,43	0,75	1,26

4.8. Допустимая геометрическая $H_г$ высота всасывающего насоса, работающего на золошлаковой пульпе в конкретной установке, может быть найдена по формуле:

$$H_г = \frac{H_v - H_в}{1 + (\Delta - 1) S} - \frac{U_в^2}{2g}, \text{ м} \tag{38}$$

где $H_в$ — потери напора во всасывающей линии при работе на золошлаковой пульпе, м вод. ст., определяются по методике расчета потерь энергии в трубопроводе с местными сопротивлениями, изложенной в разделе 3;

$U_в$ — скорость потока во всасывающем патрубке насоса, м/с.

Отрицательное значение $H_г$ укажет на величину необходимого превышения уровня гидросмеси в пульпосборнике над осью насоса.

4.9. Изменение характеристики насоса для транспортирования золошлаковой пульпы может производиться путем изменения частоты вращения вала насоса или обрезкой рабочих колес.

При изменении частоты вращения вала насоса, при допущении, что КПД сохраняет свое значение, Q, H, N изменяются следующим образом:

$$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1}; \tag{39}$$

$$H_2 = H_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2, \tag{40}$$

$$N_2 = N_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3, \tag{41}$$

где Q_1, H_1, N_1 — производительность, напор и мощность насоса при частоте вращения вала n_1;

Q_2, H_2, N_2 — те же параметры при частоте вращения вала n_2.

В случае обрезки рабочих колес Q, H, N изменяются следующим образом:

$$\frac{Q^*}{Q} = \left(\frac{D^*}{D}\right)^{1,62}; \tag{42}$$

$$\frac{H^*}{H} = \left(\frac{D^*}{D}\right)^{2,5}; \tag{43}$$

$$\frac{N^*}{N} = \left(\frac{D^*}{D}\right)^{4,0}, \tag{44}$$

где Q, H, N — производительность, напор и мощность насоса с нормальным рабочим колесом, имеющим наружный диаметр D;

Q^*, H^*, N^* — те же параметры при обрезанных колесах до диаметра D^*.

4.10. Режим параллельной работы двух центробежных насосов на один золопровод определяется графическим способом, так же как и для насосов, работающих на воде, с учетом возможного в процессе эксплуатации износа одного или двух насосов. При этом суммарная производительность двух насосов $Q_с$ должна отвечать требованию:

$$Q_с = (1{,}7 \div 2{,}0)\, Q_{опт}, \tag{45}$$

где $Q_{опт}$ — оптимальная производительность насоса.

4.11. Учитывая, что номенклатура выпускаемых насосов не может, в общем случае, содержать насоса, в точности требуемого для данной гидротранспортной установки гидравлическим расчетом разд. 3, 4, по каталогу выбирается насос, наиболее близкий к требуемому после пересчета его характеристик с воды на данную золошлаковую пульпу.

Производительность гидротранспортной системы определяют по точке пересечения расходно-напорных характеристик насоса и внешней сети.

В случае, если величина расхождения рабочей производительности с расчетной неприемлема, проектировщику представляется на выбор две возможности:

а) изменить характеристику выбранного насоса путем изменения частоты вращения вала (при помощи изменения частоты вращения двигателя) или уменьшения диаметра рабочего колеса (в допустимых пределах);

б) изменить диаметр трубопровода или консистенцию золошлаковой пульпы, для чего следует повторить все расчеты по методике, изложенной в разделе 3, имея при этом ввиду, что полученные новые значения диаметра трубопровода и концентрации гидросмеси уже не будут энергетически наивыгоднейшими.

Для получения оптимального решения иногда приходится прибегать к одновременному изменению и параметров насоса и характеристики внешней сети.

4.12. Область возможного использования насоса определяется его минимальной и максимальной производительностью.

Минимальная производительность насоса при его работе на золошлаковой пульпе определяется из условия, чтобы скорость движения пульпы в трубопроводе (как во всасывающем, так и в нагнетательном) была выше критической при заданной концентрации (3.3; 3.14).

Максимально возможная производительность нового насоса при работе на золошлаковой пульпе определяется его кавитационной характеристикой при работе на пульпе и конструкцией узла всасывания гидротранспортной установки. При бескавитационной работе насоса должно выполняться условие:

$$H_{vc} < H_v, \tag{16}$$

где H_{vc} и H_v — соответственно необходимая вакуумметрическая высота всасывания насоса в данной гидротранспортной установке и допустимая вакуумметрическая высота всасывания насоса при одинаковых значениях производительности и консистенции золошлаковой пульпы, м вод. ст.

$$H_{vc} = [1 + (\Delta - 1)\, S]\left(H_r + \frac{U_в^2}{2g}\right) + H_в. \tag{17}$$

Максимально возможная производительность насоса в заданных условиях может быть графически рассчитана как точка пересечения кривых

$$H_{vc} = f(Q) \quad \text{и} \quad H_v = f(Q).$$

В случае, если при заданных значениях производительности и концентрации гидросмеси окажется, что необходимая вакуумметрическая высота всасывания больше допустимой, необходимо менять конструкцию узла всасывания таким образом, чтобы уменьшить $H_г$ и $H_в$.

Пересчет характеристик насосов с воды на золошлаковую пульпу производится в области производительностей, определяемых выражением:

$$Q_m = Q_{wm}[1 + (\Delta - 1)S], \quad (48)$$

где Q_{wm}, Q_m — максимально допустимая производительность насоса при работе на воде и пульпе.

4.13. При гидроабразивном износе рабочих органов насоса происходит снижение расходно-напорной характеристики.

Допустимый износ определяется из условия снижения производительности золошлаковой пульпы до критического значения:

$$Q_c = FU_c. \quad (49)$$

Контроль за износом насоса должен производиться с помощью расходомера. При уменьшении производительности ниже критической, дальнейшая эксплуатация гидротранспортной системы будет производиться в режиме заиления, что может привести к закупорке трубопровода.

При отсутствии расходомерного устройства, допустимый износ может определяться по снижению напора, фиксируемому манометром.

Допустимое снижение напора δH может быть определено по формуле:

$$\delta H = H - H_c, \quad (50)$$

где H и H_c — гидравлические напоры при расчетной и критической скорости движения пульпы, м вод. ст. соответственно (п. 3.8).

Метод определения допустимого износа по снижению напора пригоден в том случае, если величина $\delta H > 0{,}07\,H$.

При выборе насосов, в качестве расчетных следует принимать характеристики, средние между характеристиками нового и допустимо изношенного насоса.

Приложение 1

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ МЕТОДИКИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЗОЛОШЛАКОПРОВОДОВ

1. Золошлаковая гидросмесь рассматривается как механическая смесь дискретных частиц золошлака (несомая среда), увлекаемых потоком воды (несущая среда). Вследствие различных локальных скоростей обеих сред, каждая твердая частица обтекается окружающей ее жидкостью с отличной от нуля относительной скоростью.

2. Для частиц золы мгновенная относительная скорость весьма мала, т. е. частицы золы движутся практически с той же продольной осредненной скоростью, как и окружающая их вода, механическое воздействие которой выражается через среднеквадратичную величину пульсационной составляющей скорости $\sqrt{\overline{w'^2}}$ и является функцией числа Рейнольдса:

$$\mathrm{Re}_w = \frac{\sqrt{\overline{w'^2}}\, d_{01}}{\nu},$$

где d_{01} — характерный размер средней частицы золы.

Вследствие малости $\sqrt{\overline{w'^2}}$ частицы золы образуют с водой гидросмесь (суспензию), которая, физически, близка к раствору и обратилась бы в раствор в случае частиц золы молекулярной крупности. Плотность ρ такой суспензии равна:

$$\rho = \rho_w [1 + (\Delta - 1) S_1],$$

где ρ_w — плотность воды;

$\Delta = \rho_a : \rho_w$ — где ρ_a агрегатная плотность частиц золы;

S_1 — объемная концентрация золы в гидросмеси.

3. *Гидравлическое сопротивление* δp_1 *трения потока суспензии* определяется по закону Дарси:

$$\delta p_1 = \lambda \frac{1}{D} \frac{\rho_w U^2}{2} [1 + (\Delta - 1) S_1],$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления;

D — диаметр трубопровода;

U — скорость потока суспензии.

Коэффициент λ является функцией числа Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{UD}{\nu} = \frac{UD}{\mu} [\rho_w [1 + (\Delta - 1) S_1].$$

Здесь μ — физическая вязкость смеси воды с золой, связанная с концентрацией S_1 экспериментальной зависимостью (23).

4. Если в составе транспортируемой взвеси кроме золы имеются гораздо более крупные, чем она, частицы шлака, средней крупности d_{02}, при концентрации S_2, то транспортирование этих частиц производится уже не водой, а смесью воды и золы крупности d_{01} при ее концентрации S_1, образующей суспензию плотности ρ и физической вязкости μ.

В отличие от мелких частиц золы, частицы шлака, вследствие трения о дно трубы движутся с продольными скоростями, отличными от скорости воды, т. е. имеют по отношению к суспензии некоторую относительную скорость и, в этом относительном движении, в общем случае, представляют для суспензии дополнительное к δp_1 гидравлическое сопротивление δp_2, так что общее гидравлическое сопротивление трения потоку золошлака δp равно:

$$\delta p = \delta p_1 + \delta p_2.$$

Величина сопротивления δp_2 определяется относительной скоростью воды по отношению к частицам шлака. За отсутствием в настоящее время надежного опытного материала и пользуясь экспериментально доказанной линейной зависимостью средней относительной скорости («скольжения») частиц шлака от скорости потока, дополнительные потери δp_2 можно в опытной формуле представить в виде функции от скорости гидросмеси.

Реальные золошлаки принято характеризовать кумулятивными кривыми гранулометрического состава. Для использования расчетных формул каждая из этих кривых должна быть разбита минимум на две части. К первой части относятся фракции крупности $d_{01} < d_{00}$, образующие в смеси с водой суспензию концентрации S_1, в которой транспортируется вторая часть смеси с фракциями крупности $d_{02} > d_{00}$ с концентрацией S_2 так, что:

$$S_1 + S_2 = S,$$

где S — концентрация золошлака в целом.

Граница между обеими составными частями золошлака зависит от скорости потока пульпы: чем выше скорость потока пульпы, тем все более крупные зерна взвеси должны быть отнесены к первой группе. Иными словами граница крупности является границей не геометрической, а кинематической крупности. По опытам с золошлаками установлено соотношение:

$$\frac{U}{w_{00}} = 30,$$

где U — скорость пульпы;

W_{00} — гидравлическая крупность зерен золошлака геометрической крупности d_{00}.

Аналитический расчет критических скоростей гидротранспорта сыпучих тел возможен только на основе двухмерной и трехмерной схем движения гидросмесей и до разработки этих схем остается областью чистой эмпирики.

Погрешность опытов по определению гидравлических потерь в лабораторных пульповодах оценивается величиной порядка $\pm 10\%$.

Погрешность определения критических скоростей в силу специфики глазомерного определения начала образования неподвижного слоя отложений твердой фазы на дне трубы, несколько выше, и не менее 13—15%. Именно этому условию и удовлетворяет приведенная в «Рекомендациях» формула (31).

Приложение 2

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗОЛЫ И ШЛАКА

1. Гранулометрический состав золы и шлака [1, 2]

Общие сведения

Зола — продукт сгорания топлива, который выносится дымовыми газами из топки котла и улавливается золоуловителями;

шлак — частицы продуктов сжигания, которые скапливаются по мере сгорания топлива в шлакосборниках.

Гранулометрический состав золы и шлака данного твердого топлива зависит от следующих факторов:

конструкции топок котлоагрегатов (с жидким и твердым шлакоудалением);

условий работы котлов (паровые нагрузки, равномерность и температура горения топлива в камере сжигания, сжигание топлива совместно с мазутом и пр.);

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

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

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 коли-

[1] **Руководство** по проектированию золоотвалов тепловых электрических станций. Л., «Энергия», 1974, с. 60—76. П 20-74 ВНИИГ.

[2] **Пантелеев В. Г.** Некоторые физико-механические характеристики золы и шлака тепловых электростанций. — «Электрические станции», 1975, № 10, с. 27—29.

чество 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 попадания мазута на электроды в электрофильтрах).

На состав золы оказывают влияние и условия (качество) эксплуатации электрофильтров, а на состав шлака — устройства, с помощью которых этот материал подается в систему ГЗУ (шнеки, транспортеры) из холодных воронок или шлакосмывных шахт, а также конструкций шлакодробилок.

Золоулавливающие устройства в зависимости от гранулометрического состава золы, поступающей в каналы ГЗУ, можно разделить на две группы:

1) мокрые золоуловители, вертикальные электрофильтры, инерционные (механические) золоуловители, имеющие по ходу очистки дымовых газов один золоулавливающий аппарат;

2) двухступенчатые или комбинированные золоуловители (инерционные золоуловители — первая ступень, предвключенные в электрофильтры — вторая ступень), многополыные горизонтальные электрофильтры и инерционные золоуловители, имеющие по ходу очистки дымовых газов несколько аппаратов.

Основное отличие указанных устройств следующее: для уловителей первой группы зола, поступающая в смывные каналы ГЗУ, характеризуется средним по крупности составом; для золоуловителей второй группы — зола каждого аппарата не отражает среднего состава всего материала, а распределена по выпускам по крупности (фракционному составу) — наиболее крупные частицы золы, как правило, улавливаются на первых аппаратах, наиболее мелкие — на последующих.

Гранулометрический состав золы

На основании обследования 68 ТЭС, оборудованных различными по конструкции золоулавливающими устройствами и работающими на различных твердых топливах, были построены обобщающие кривые гранулометрического состава золы на следующих рисунках: рис. 3 — для золоуловителей первой группы (*а, б, в, г* — угольные топлива; *д* — сланец; *е* — торф; топливо измельчалось: *а* — барабанно-шаровыми; *б, д, е* — молотковыми, *в* — среднеходовыми валковыми мельницами; *г* — мелющими вентиляторами); рис. 4 — для золоуловителей второй группы (только инерционные золоуловители *а* — форт-камеры; *б* — батарейные циклоны; комбинированные зелеуловители, первая ступень; *в* — осадительные камеры; *г* — батарейные циклоны; вторая ступень;

д — первое; *е* — второе; *ж* — третье и четвертое поля электрофильтров).

Эти кривые построены с учетом наиболее важных факторов, которые влияют на состав золы. На основании обобщения результатов изучения гранулометрического состава золы можно сделать следующие выводы:

1) состав золы зависит от тонкости помола топлива и, как следствие этого, механизма пылеприготовления. Согласно рис. 3, при измельчении топлива барабанно-шаровыми и средне-ходовыми валковыми мельницами, зола в целом является более тонкой, чем зола при измельчении топлива молотковыми мельницами и мелющими вентиляторами;

2) зола, уловленная мокрыми золоуловителями, при усреднении является более тонкой, чем зола уловленная сухими золоуловителями;

3) состав золы, отобранной из многоступенчатых золоуловителей, зависит от количества последовательно включенных аппаратов золоулавливания. Зола, уловленная первым по ходу очистки дымовых газов аппаратом (на ТЭС обычно устанавливаются осадительные камеры), характеризуется крайне неодинаковым составом; однако зола, уловленная вторым золоулавливающим аппаратом, независимо от рода твердого топлива, имеет достаточно близкие составы (рис. 4);

4) состав золы, уловленной многопольными горизонтальными электрофильтрами, зависит от рода твердого топлива, а также количества и коэффициентов золоулавливания предвключенных аппаратов, в качестве которых на ТЭС обычно устанавливаются осадительные или форт-камеры или же батарейные циклоны. При комбинированном золоулавливании наиболее крупные фракции золы улавливаются на первой ступени очистки дымовых газов, а наиболее мелкие на второй — на электрофильтрах. Состав золы, уловленной вторым, третьим и четвертым полями электрофильтров, изменяется незначительно: такая зола является весьма тонкой при максимальном размере частиц не более 0,25 мм (рис. 4);

5) минимальная крупность частиц золы, поступающая в систему каналов ГЗУ, приблизительно равна $d_{мин\,з}=0{,}005$ мм.

Зола торфа является наиболее крупной, а зола эстонских сланцев и ангренских углей наиболее мелкой.

Гранулометрический состав шлака

На ТЭС в зависимости от конструкции котлоагрегата в топках образуются две разновидности шлака: твердый и жидкой, 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 топ-

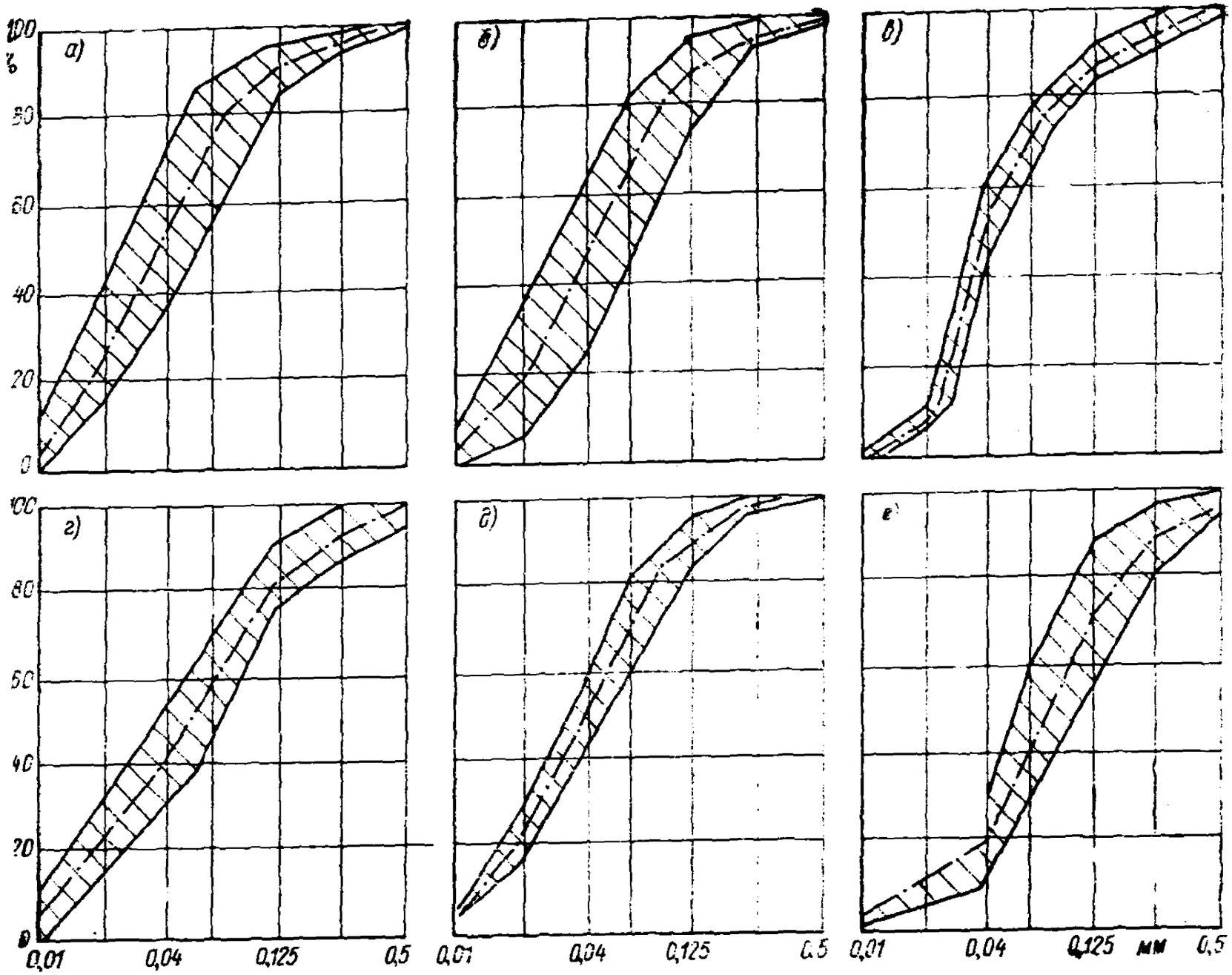

Рис. 3.

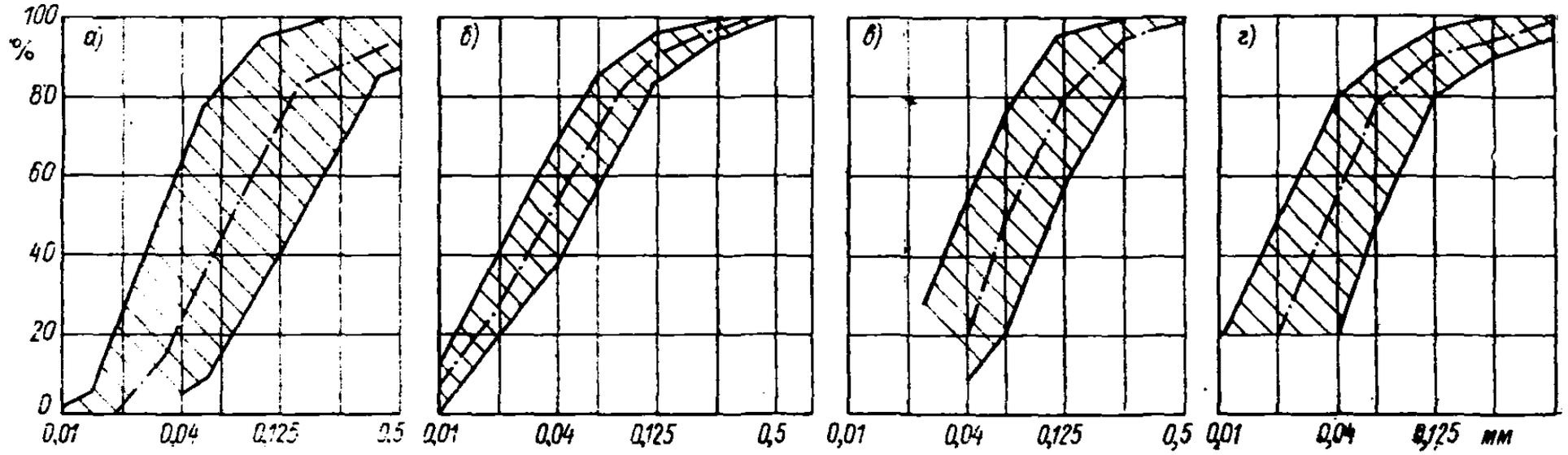

Рис. 4.

ках может образовываться мелкий по составу шлак (от сжигания торфа и сланцев) или достаточно крупный (от сжигания некоторых углей), но обладающий крайне малой прочностью. К таким разновидностям угольного шлака относятся тугоплавкие шлаки, имеющие температуру размягчения $t_2 = 1350°$ С — экибастузского, карагандинского, райчихинского, лермонтовского, смеси ткибульского и ткварчельского, азейского, черемховского и некоторых др. углей. Для твердого шлака указанных топлив для разрушения в топках котлов крупных включений 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.

Для твердого шлака угольных топлив — среднеплавких $t_2 = 1350 \div 1250°$ С, а также легкоплавких $t_2 = 1250°$ С (шлак гусиноозерского, кузнецкого, смеси черновского и харанорского, киргизского, челябинского, ангренского, львовско-волынского и некоторых других углей), а иногда даже и для жидкого шлака, при периодическом сбросе и небольшом абсолютном выходе шлака с каждого котлоагрегата, его часто не измельчают перед сбросом в смывной канал. В этом случае с целью исключения попадания в каналы ГЗУ крупных включений шлака на ряде ТЭС перед сбросом установлены решетки с размером ячеек $8 \times 8 \div 10 \times 10$ см.

В других случаях эксплуатации ТЭС среднеплавкий и легкоплавкий шлак угольных топлив измельчают дробилками.

Шлак угольных топлив ТЭС рекомендуется разделять на следующие группы:

твердый измельченный шлак;

твердый неизмельченный шлак — крупный, средней крупности и мелкий;

жидкий шлак измельченный;

жидкий шлак неизмельченный;

твердый шлак сланцев;

твердый шлак торфа.

К мелкому, кроме шлака торфа и сланцев, относится тугоплавкий шлак угольных топлив, а к крупному — легкоплавкий. Шлак сланцев — наиболее мелкий по составу, а наиболее крупный — жидкий неизмельченный шлак.

На рис. 5 приводятся осредненные (пунктирная линия) кривые гранулометрического состава выделенных групп шлака (*а, б, в, г, д, з* — угольные топлива; *е* — сланец, *ж* — торф; *а, б, в, г, е, ж* — твердый, *д, з,* — жидкий шлак; *а, б, в, е, ж, з* — неизмельченный; *г, д* — измельченный шлак; твердый шлак угольных топлив; *а* — мелкий; *б* — средней крупности, *в* — крупный).

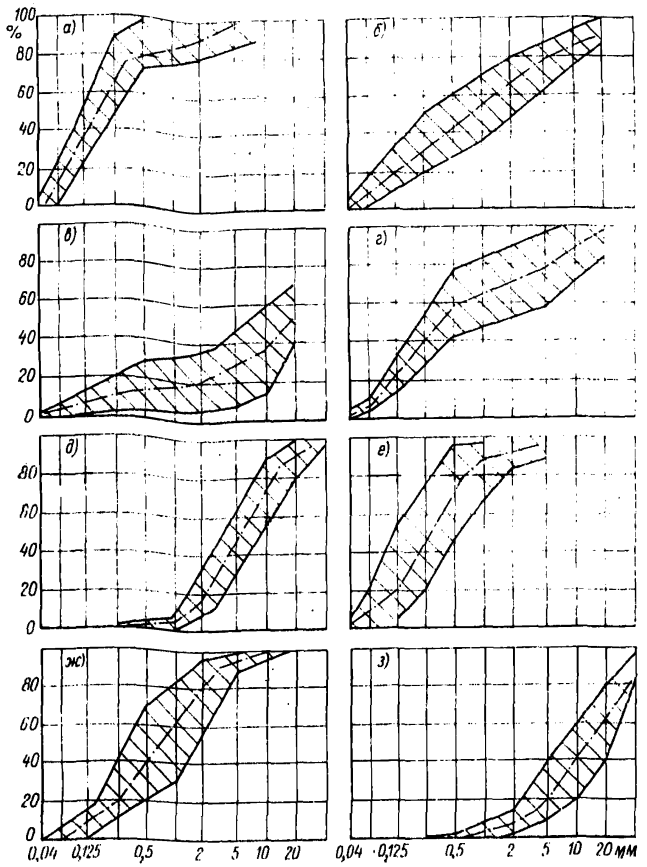

Рис. 5.

Выбор расчетного состава золошлаковых материалов при проектировании гидротранспорта.

Зола и шлак на ТЭС транспортируются на отвал совместно или раздельно.

При раздельном удалении золы для золоуловителей группы I *средний гранулометрический состав следует принимать в зависимости* от рода твердого топлива и конструкции пылеугольных мельниц согласно табл. 8. Приводимый в табл. 8 средний состав золы получен на основании осреднения данных рис. 3.

Для многоступенчатых золоуловителей средний гранулометрический состав золы, поступающей в багерную насосную станцию, следует принимать либо на основании осреднения данных табл. 8 (при известных составе и КПД золоуловителей; КПД золоуловителей принимается на основании технологического задания), либо приближенно равным составу золы одноступенчатых золоуловителей (что справедливо при близости КПД золоуловителей — это условие обычно выполняется при эксплуатации ТЭС).

Таблица 8

Осредненный гранулометрический состав золы различных топлив

Пылеугольные мельницы и золоуловители	Процентное содержание фракций, 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
1	2	3	4	5	6	7	8
1-я группа золоуловителей							
Угольные топлива:							
барабанно-шаровые мельницы . .	—	4	9	21	39	22	5
молотковые мельницы	—	4	12	25	39	15	5
среднеходовые валковые мельницы	—	5	9	20	56	10	—
мелющие вентиляторы	—	8	15	22	31	18	6
Молотковые мельницы:							
сланцы	—	2	12	25	38	16	7
торф	5	5	27	32	19	8	4
2-я группа золоуловителей							
Инерционные золоуловители: (последовательность включения)							
первый аппарат	7	7	24	31	31	—	—
второй аппарат	—	3	10	24	35	20	8
Комбинированные золоуловители: (последовательность включения)							
Инерционные золоуловители: (первая ступень)							
осадительные камеры	—	7	23	36	34	—	—
батарейные циклоны	—	7	9	18	44	22	—
Электрофильтры (вторая ступень)							
первое поле	—	5	16	19	60	—	—
второе	—	4	11	15	32	28	10
третье	—	1	3	11	39	31	15
четвертое поле	—	1	3	11	39	31	15

При раздельном удалении шлака его средний гранулометрический состав шлака следует принимать в зависимости от рода сжигаемого твердого топлива, системы шлакоудаления и температуры плавления t_2 согласно табл. 9.

При совместном удалении гранулометрический состав смеси продуктов сжигания должен быть получен на основании пересчета по известному содержанию шлака $P_ш$ в общем количестве золошлаковых материалов, выдаваемых ТЭС, $P_{зш}$. При этих вычислениях содержание шлака следует принимать либо на основании технологического задания, либо приближенно в зависимости от конструкции котлоагрегата: для топок с холодными воронками $P_ш \sim 15\%$, для топок с утепленными воронками 25%, для однокамерных топок с жидким шлакоудалением 40% и для циклонных топок ВТИ с жидким шлакоудалением 55%. В табл. 10 приводятся наиболее характерные средние гранулометрические составы смеси золы и шлака различных твердых топлив, вычисленные на основании данных табл. 8, 9.

Таблица 9

Осредненный гранулометрический состав шлака

Шлак	Процентное содержание фракций, 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
Угольные топлива										
Твердый измельченный . . .	—	11	10	9	5	6	19	22	13	5
Твердый неизмельченный:										
мелкий	—	—	—	8	7	6	14	35	20	10
средней крупности *	7	8	6	14	11	11	12	15	12	4
крупный*	46	16	7	9	3	3	3	6	3	4
Жидкий измельченный . . .	9	16	27	32	12	2	2	—	—	—
Жидкий неизмельченный * . .	37	23	20	13	5	2	—	—	—	—
Сланцы	—	—	—	6	4	19	25	29	11	6
Торф	—	—	7	13	19	21	21	11	6	2

* Максимальный размер отдельных кусков шлака, поступающих в каналы ГЗУ, составляет 80—100 мм (см. также табл. 10).

При этих вычислениях было принято: гранулометрический состав шлака согласно табл. 9, золы — табл. 8, 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); выход шлака для торфа был принят на основании производственных данных равным 5%.

Приведенные в табл. 8, 9 и 10 материалы соответствуют средним составам золы, шлака, смеси золы и шлака. Предельные составы (минимальные или максимальные) могут быть получены из графиков рис. 3, 4, 5 — левые и правые огибающие кривые — при известном проценте выхода золы и шлака с ТЭС.

Таблица 10

Осредненный гранулометрический состав смеси золы и шлака

Смесь золы и шлака	Процентное содержание фракций, 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
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
Твердый неизмельченный:												
мелкий	—	—	—	1,2	1,1	0,9	5,5	15,4	24,2	34,7	12,7	4,3
средней крупности	1,1	1,2	0,9	2,1	1,6	1,6	5,2	12,5	23,0	34,2	12,7	4,3
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
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
Жидкий неизмельченный	14,8	9,2	8,0	5,2	2,0	0,8	2,4	7,2	15,0	23,4	9,0	3,0
Сланцы	—	—	—	0,9	0,6	2,8	5,5	14,6	22,8	33,3	13,6	5,9
Торф	—	—	0,4	0,6	0,9	5,8	5,8	26,2	30,7	18,2	7,6	3,8

2. Агрегатный удельный вес золы и шлака

Общие сведения

В расчетах систем ГЗУ используются две физические величины — удельный вес и агрегатный удельный вес частиц золы и шлака.

Удельный вес — физическая величина, равная для дисперсных тел пределу отношения веса материала $P_м$, слагающего частицу, к его объему V при неограниченном уменьшении (растирании) этой частицы

$$\gamma = \lim_{\Delta v \to 0} \left| \frac{\Delta P_м}{\Delta V} \right|.$$

Агрегатный удельный вес — отношение веса частицы $P_ч$ к ее объему $V_ч$

$$\gamma_а = \frac{P_ч}{V_ч}.$$

Величины удельного веса и агрегатного удельного веса равны только тогда, когда частицы не имеют замкнутых пор. Примером таких материалом служат песок, гравий и пр.

Частицы золы и шлака имеют замкнутые поры, заполненные воздухом и поэтому для них удельный вес и агрегатный удельный вес не равны. Эти физические величины связаны между собой следующей зависимостью:

$$\gamma_а = \gamma (1 - n_а'),$$

где $n'_а$ — относительная величина объема замкнутых пор в долях единицы объема частицы.

В табл. 11 приводятся удельный вес, агрегатный удельный вес и объем замкнутых пор шлака многих твердых топлив ТЭС.

Объем замкнутых пор частиц золы в среднем не превышает 4—5%, поэтому для золы агрегатный удельный вес и удельный вес приблизительно равны $\gamma_a \approx \gamma$.

Отдельные частицы, входящие в состав золы и шлака, имеют неодинаковый химический состав и, как следствие этого, неодинаковый агрегатный удельный вес. Поэтому массу золошлаковых материалов характеризует так называемый, средний [1] агрегатный удельный вес, равный отношению веса всех кусков естественной крупности в пробе $\Sigma P_м$ к их объему ΣV, $\gamma_a = \frac{\Sigma P_м}{\Sigma V}$.

Выбор расчетного агрегатного удельного веса золошлаковых материалов при проектировании гидротранспорта

Агрегатный удельный вес золошлаковых материалов ТЭС при проектировании гидротранспорта следует принимать согласно табл. 12, в которой раздельно приводятся данные по удельному весу золы, твердого и жидкого шлака различных топлив ТЭС. В тех случаях, когда для золы и шлака даются пределы агрегатного удельного веса, при расчете гидротранспорта, с целью запаса, следует принимать максимальные значения этой физической величины.

При совместном удалении золы и шлака, при условии, что их агрегатный удельный вес неодинаков, агрегатный удельный вес смеси $\overline{\gamma}_{зш}$ должен быть вычислен по известному выходу золы и шлака с ТЭС по следующей формуле:

$$\overline{\gamma}_{а\,зш} = \frac{P_ш \overline{\gamma}_{а\,ш} + (100 - P_ш)\overline{\gamma}_{а\,з}}{100},$$

где $\overline{\gamma}_{аз}$, $\overline{\gamma}_{аш}$ — агрегатный удельный вес соответственно, золы и шлака (*табл. 12*).

---

[1] В последующем с целью сокращения средний агрегатный удельный вес будем обычно называть агрегатным весом.

Таблица 11

Значения γ, γ_a, n_a' для шлака твердых топлив различных ТЭС

Вид шлака	Наименование ТЭС	Вид сжигаемого угля	Удельный вес $\gamma \cdot 10^4$, Н/м³	Средний агрегатный удельный вес $\gamma_a \cdot 10^4$, Н/м³	n_a', %
Жидкий	Назаровская ГРЭС	Ирша-бородинский	3,45	3,15	9
	Ангренская ГРЭС	Ангренский	2,96	2,92	1,5
	Бурштынская ГРЭС	Львовско-волынский	2,83	2,67	5,5
	Молдавская ГРЭС	Донецкий	2,81	2,65	6
	ТЭЦ Челябинского металлургического завода	Челябинский	2,57	2,45	5
				Среднее	~5
Твердый	Щекинская ГРЭС	Подмосковный	2,81	2,76	2
	Новомосковсая ГРЭС	Подмосковный	2,68	2,59	3,5
	Иркутская ТЭЦ-9	Азейский	2,67	1,94	27
	Добротворская ГРЭС	Львовско-волынский	2,63	2,26	14
	Ферганская ТЭЦ	Ташкумырский и др. киргизские	2,61	1,90	27
	Улан-Удэнская ТЭЦ	Гусиноозерский	2,61	1,74	33,5
	Кировская ГРЭС	Интинский и воркутинский	2,59	2,07	23
	Ангренская ГРЭС	Ангренский	2,57	2,48	3,5
	Читинская ГРЭС	Черновский и харанорский	2,57	1,66	35
	Омская ТЭЦ-4	Экибастузский	2,56	2,15	16
	Ленинградская ТЭЦ-17	Кузнецкий	2,55	1,90	26
	Иркутская ТЭЦ-10	Черемховский	2,50	1,96	22
	Райчихинская ГРЭС	Райчихинский	2,53	2,45	3,0
	Интинская ТЭЦ	Печорский	2,41	2,40	0,5
	Магаданская ТЭЦ	Ургальский	2,41	1,58	35
	Ткварчельская ГРЭС	Ткварчельский и ткибульский	2,57	2,36	8,5
	Аркагалинская ГРЭС	Аркагалинский	2,54	2,22	13
	Партизанская ГРЭС	Подгородненский и партизанский	2,29	1,78	22,5
	Воркутинская ТЭЦ-2	Воркутинский	2,28	2,12	7
	Челябинская ТЭЦ-2	Челябинский	2,23	2,04	9
	Алма-Атинская ГРЭС	Угли Куу-Чекинского разреза Карагандинского месторождения	2,16	2,06	4,5
	Сахалинская ГРЭС	Лермонтовский	2,13	1,93	9,5
				Среднее	~15

Таблица 12

Пределы значений $\overline{\gamma_a}$ золы и шлака различных твердых топлив

Род топлива	Средний агрегатный удельный вес, $\gamma_a \cdot 10^4$, Н/м³		
	Зола	Твердый шлак	Жидкий шлак
Угли:			
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	2,9—2,6
райчихинский	2,55—2,40	2,4—2,0	—
донецкий	2,45—2,3	2,0	2,65
львовско-волынский	2,45—2,3	2,2	2,45
печорский	2,40	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-кияский и др. киргизские угли	2,4—2,25	2,3—2,15	—
челябинский	2,3—2,1	2,2—2,1	2,45—2,5
ташкумырский и др. киргизские угли	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 и др. дальневосточные угли	2,2—2,1	1,9—1,8	—
харанорский	2,2	—	—
воркутинский	2,15—2,10	2,15—2,0	—
кузнецкий	2,15	1,9	2,5
экибастузский	2,15—1,95	2,2—2,1	—
ургальский	2,14	1,60	—
быковский, синегорский (месторождения о. Сахалин)	2,13	2,0—1,8	—
лермонтовский (месторождения о. Сахалин)	2,0	1,9	—
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	—
Сланцы:			
эстонский	3,1—2,9	2,9—2,7	3,2
гдовский	2,8	2,8	—
кашпирский	2,75	2,8	—

Экспериментальные данные института УкрНИИГидроуголь по гидротранспорту золошлаковых материалов

В этом приложении, дополнительно к принятым в разделе 1 обозначениям, принято:

1) i — гидравлический уклон потока гидросмеси в трубе, равный:

$$i = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\Delta p}{L},$$

где Δp — разность давлений p, Па, в потоке гидросмеси в двух поперечных сечениях трубы, находящихся на расстоянии L друг от друга.

2) C'_p — весовая расходная консистенция золошлаковой пульпы — отношение суммы весов всех движущихся твердых частиц, прошедших в единицу времени через любое поперечное сечение трубы, ко всему объему пульпы, прошедшему через то же сечение в единицу времени (табл. 13).

Таблица 13

Золошлаковые материалы Ивановской ГРЭС

$d_{ср} = 0{,}23$ мм $\qquad \gamma_т = 2{,}76 \cdot 10^4$ Н/м³

Ситовый состав

Классы, мм	>0,5	0,5—0,3	0,3—0,2	0,2—0,10	0,10—0,071	<0,071
Выход классов, %	14,00	22,75	0,13	15,05	24,05	23,42

$D = 149$ мм

$\gamma=1{,}05 \cdot 10^4$ Н/м³; $S=2{,}84\%$ $C_p'=7{,}10\%$; $U_c=1{,}35$ м/с	U, м/с	1,35	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50
	i	0,0129	0,0148	0,0242	0,0369	0,0499	0,0642
$\gamma=1{,}15 \cdot 10^4$ Н/м³; $S=8{,}72\%$ $C_p'=20{,}6\%$; $U_c=1{,}55$ м/с	U, м/с	1,55	2,00	2,50	3,00	—	—
	i	0,0189	0,0274	0,0401	0,0547	—	—
$\gamma=1{,}25 \cdot 10^4$ Н/м³; $S=14{,}5\%$ $C_p'=31{,}6\%$; $U_c=1{,}50$ м/с	U, м/с	1,50	2,00	2,50	3,00	—	—
	i	0,0202	0,0294	0,0427	0,0601	—	—
$\gamma=1{,}35 \cdot 10^4$ Н/м³; $S=20{,}4\%$ $C_p'=41{,}2\%$; $U_c=1{,}45$ м/с	U, м/с	1,45	2,00	2,50	—	—	—
	i	0,0204	0,0328	0,0483	—	—	—

$D = 202$ мм

$\gamma=1{,}05 \cdot 10^4$ Н/м³; $S=2{,}84\%$ $C_p'=7{,}10\%$; $U_c=1{,}50$ м/с	U, м/с	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50
	i	0,0108	0,0186	0,0267	0,0355	0,0469
$\gamma=1{,}15 \cdot 10^4$ Н/м³; $S=8{,}72\%$ $C_p'=20{,}6\%$; $U_c=1{,}80$ м/с	U, м/с	1,80	2,00	2,50	3,00	—
	i	0,0107	0,0207	0,0291	0,0399	—
$\gamma=1{,}25 \cdot 10^4$ Н/м³; $S=14{,}5\%$ $C_p'=31{,}6\%$; $U_c=1{,}65$ м/с	U, м/с	1,65	2,00	2,50	3,00	—
	i	0,0175	0,0224	0,0321	0,0439	—
$\gamma=1{,}35 \cdot 10^4$ Н/м³; $S=20{,}4\%$ $C_p'=41{,}2\%$; $U_c=1{,}65$ м/с	U, м/с	1,65	2,00	2,00	3,00	—
	i	0,0191	0,0246	0,0347	0,0479	—

$D = 250$ мм

$\gamma=1{,}05\cdot10^4$ Н/м³; $S=2{,}84\%$ $C_p'=7{,}10\%$; $U_c=1{,}75$ м/с	U, м/с	1,75	2,00	2,50	3,00
	i	0,0099	0,0134	0,0202	0,0268
$\gamma=1{,}15\cdot10^4$ Н/м³; $S=8{,}72\%$ $C_p'=20{,}6\%$; $U_c=2{,}00$ м/с	U, м/с	2,00	2,50	3,00	—
	i	0,0158	0,0225	0,0301	—
$\gamma=1{,}25\cdot10^4$ Н/м³; $S=14{,}5\%$ $C_p'=31{,}6\%$; $U_c=1{,}80$ м/с	U, м/с	1,80	2,00	2,50	3,00
	i	0,0156	0,0189	0,0258	0,0346
$\gamma=1{,}35\cdot10^4$ Н/м³; $S=20{,}4\%$ $C_p'=41{,}20\%$; $U_c=1{,}80$ м/с	U, м/с	1,80	2,00	2,50	—
	i	0,0181	0,0204	0,0294	—

$D = 306$ мм

$\gamma=1{,}05\cdot10^4$ Н/м³; $S=2{,}84\%$ $C_p'=7{,}10\%$; $U_c=2{,}30$ м/с	U, м/с	2,30	2,50	3,00	3,50	4,00
	i	0,0130	0,0157	0,0213	0,0277	0,0361
$\gamma=1{,}15\cdot10^4$ Н/м³; $S=8{,}72\%$ $C_p'=20{,}60\%$; $U_c=2{,}40$ м/с	U, м/с	2,40	2,50	3,00	3,50	4,00
	i	0,0150	0,0169	0,0228	0,0302	0,0391
$\gamma=1{,}25\cdot10^4$ Н/м³; $S=14{,}5\%$ $C_p'=31{,}60\%$; $U_c=2{,}30$ м/с	U, м/с	2,30	2,50	3,00	3,50	—
	i	0,0152	0,0178	0,0248	0,0322	—
$\gamma=1{,}35\cdot10^4$ Н/м³; $S=20{,}40\%$ $C_p'=41{,}20\%$; $U_c=2{,}10$ м/с	U, м/с	2,10	2,50	3,00	3,50	—
	i	0,0145	0,0201	0,0265	0,0374	—
$\gamma=1{,}45\cdot10^4$ Н/м³; $S=26{,}20\%$ $C_p'=49{,}20\%$; $U_c=1{,}95$ м/с	U, м/с	1,95	2,50	3,00	3,50	—
	i	0,0145	0,0227	0,0293	0,0377	—
$\gamma=1{,}55\cdot10^4$ Н/м³; $S=32{,}00\%$ $C_p'=56{,}20\%$; $U_c=1{,}80$ м/с	U, м/с	1,80	2,00	2,50	3,00	—
	i	0,0145	0,0170	0,0247	0,0323	—

$D = 358$ мм

$\gamma=1{,}05\cdot10^4$ Н/м³; $S=2{,}84\%$ $C_p'=7{,}10\%$; $U_c=2{,}50$ м/с	U, м/с	2,50	3,00	3,50	4,00
	i	0,0135	0,0182	0,0245	0,0318
$\gamma=1{,}15\cdot10^4$ Н/м³; $S=8{,}72\%$ $C_p'=20{,}60\%$; $U_c=2{,}50$ м/с	U, м/с	2,50	3,00	3,50	4,00
	i	0,0148	0,0202	0,0275	0,0343
$\gamma=1{,}25\cdot10^4$ Н/м³ $S=14{,}50\%$ $C_p'=31{,}60\%$; $U_c=2{,}50$ м/с	U, м/с	2,50	3,00	3,50	—
	i	0,0175	0,0227	0,0298	—
$\gamma=1{,}35\cdot10^4$ Н/м³; $S=20{,}40\%$ $C_p'=41{,}20\%$; $U_c=2{,}50$ м/с	U, м/с	2,50	3,00	3,50	—
	i	0,0188	0,0247	0,0340	—

D=410 мм

γ=1,05·10⁴ Н/м³; S=2,84% C_p=7,10%; U_c=2,50 м/с	U, м/с i	2,50 0,0121	3,00 0,0161	3,50 0,0204	4,00 0,0270
γ=1,15·10⁴ Н/м³; S=8,72% C_p=20,60%; U_c=2,90 м/с	U, м/с i	2,90 0,0167	3,00 0,0184	3,50 0,0224	4,00 0,0295
γ=1,25·10⁴ Н/м³; S=14,50% C_p=31,60%; U_c=3,00 м/с	U, м/с i	3,00 0,0204	3,50 0,0244	4,00 0,0315	— —

Золошлаковые материалы Троицкой ГРЭС

$d_{ср}$ = 0,14 мм γ_a=2,00·10⁴ Н/м³

Ситовый состав

Классы, мм	>0,8	0,4—0,8	0,2—0,4	0,1—0,2	0,07—0,10	<0,07
Выход классов, %	2,5	1,6	11,0	36,1	12,5	36,3

D = 202 мм

γ=1,108·10⁴ Н/м³; S=10,8% C_p'=19,5%; U_c=1,80 м/с	U, м/с i	1,80 0,0175	2,00 0,0206	2,50 0,0286	3,00 0,0370	3,50 0,0492	4,00 0,065
γ=1,181·10⁴ Н/м³; S=18,1% C_p'=30,4%; U_c=1,70 м/с	U, м/с i	1,70 0,0185	2,00 0,0226	2,50 0,0301	3,00 0,0400	3,50 0,0532	4,00 0,0694
γ=1,27·10⁴ Н/м³; S=27,0% C_p'=41,50%; U_c=1,60 м/с	U, м/с i	1,60 0,0195	2,00 0,0256	2,50 0,0346	3,00 0,0455	3,50 0,0577	— —
γ=1,362·10⁴ Н/м³; S=36,2% C_p'=53,0%; U_c=1,50 м/с	U, м/с i	1,50 0,0205	2,00 0,0296	2,50 0,0396	3,00 0,0515	3,50 0,0683	— —
γ=1,427·10⁴ Н/м³; S=42,7% C_p'=60%; U_c=1,40 м/с	U, м/с i	1,40 0,0210	2,00 0,0336	2,50 0,0461	3,00 0,0603	3,50 0,0783	— —

D = 510 мм*

γ=1,025·10⁴ Н/м³; S=2,5% C_p=4,8%; U_c=2,0 м/с	U, м/с i	2,00 0,0061	2,50 0,0088
γ=1,05·10⁴ Н/м³ S=5,0% C_p=9,6%; U_c=2,05 м/с	U, м/с i	2,05 0,0069	2,50 0,0095
γ=1,06·10⁴ Н/м³; S=6,0% C_p = 11,3%; U_c=2,10 м/с	U, м/с i	2,10 0,0075	2,50 0,0100

* Замеры произведены на действующем золопроводе Троицкой ГРЭС.

$D = 614$ мм

$\gamma=1{,}05\cdot10^4$ Н/м³; $S=5{,}0\%$ $C_p'=9{,}6\%$; $U_c=2{,}20$ м/с	U, м/с	2,20	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50
	i	0,0059	0,0071	0,0097	0,0132	0,0167	0,0217
$\gamma=1{,}10\cdot10^4$ Н/м³; $S=10{,}0\%$ $C_p'=18{,}2\%$; $U_c=2{,}30$ м/с	U, м/с	2,30	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50
	i	0,0077	0,0084	0,0107	0,0145	0,0182	0,0227
$\gamma=1{,}15\cdot10^4$ Н/м³; $S=15{,}0\%$ $C_p'=26{,}1\%$; $U_c=2{,}40$ м/с	U, м/с	2,40	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50
	i	0,0091	0,0094	0,0119	0,0155	0,0197	0,0239
$\gamma=1{,}20\cdot10^4$ Н/м³; $S=20{,}0\%$ $C_p'=33{,}4\%$; $U_c=2{,}35$ м/с	U, м/с	2,35	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50
	i	0,0101	0,0104	0,0130	0,0170	0,0207	0,0252
$\gamma=1{,}25\cdot10^4$ Н/м³; $S=25{,}0\%$ $C_p'=40{,}0\%$; $U_c=2{,}20$ м/с	U, м/с	2,20	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50
	i	0,0103	0,0111	0,0137	0,0180	0,0219	0,0272
$\gamma=1{,}30\cdot10^4$ Н/м³; $S=30{,}0\%$ $C_p'=46{,}2\%$; $U_c=2{,}20$ м/с	U, м/с	2,20	2,50	3,00	3,50	4,00	—
	i	0,0113	0,0123	0,0149	0,0195	0,0237	—

Золошлаковые материалы Прибалтийской ГРЭС

$d_{ср} = 0{,}29$ мм $\qquad\qquad$ $\gamma_a=2{,}50\cdot10^4$ Н/м

Ситовый состав

Классы, мм	>0,8	0,80—0,28	0,28—0,20	0,20—0,14	0,14—0,10	0,10—0,071	<0,071
Выход классов, %	2,50	36,75	11,10	11,05	7,30	13,15	18,15

$D = 202$ мм

$\gamma=1{,}10\cdot10^4$ Н/м³; $S=6{,}65\%$ $C_p'=15{,}10\%$ $U_c=1{,}50$ м/с	U, м/с	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50
	i	0,0105	0,0186	0,0271	0,0360	0,0477	0,0619	0,0753
$\gamma=1{,}20\cdot10^4$ Н/м³ $S=13{,}3\%$; $C_p'=27{,}60\%$ $U_c=1{,}60$ м/с	U, м/с	1,60	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	—
	i	0,0150	0,0216	0,0296	0,0405	0,0552	0,0699	—
$\gamma=1{,}30\cdot10^4$ Н/м³; $S=20{,}0\%$ $C_p'=38{,}4\%$; $U_c=1{,}55$ м/с	U, м/с	1,55	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	—
	i	0,0160	0,0241	0,0346	0,0450	0,0587	0,0789	—
$\gamma=1{,}40\cdot10^4$ Н/м³ $S=26{,}6\%$ $C_p'=47{,}5\%$; $U_c=1{,}50$ м/с	U, м/с	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	—
	i	0,0170	0,0271	0,0381	0,0500	0,0642	0,0864	—
$\gamma=1{,}50\cdot10^4$ Н/м³; $S=32{,}4\%$ $C_p'=54{,}0\%$; $U_c=1{,}35$ м/с	U, м/с	1,35	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00
	i	0,0170	0,0190	0,0301	0,0426	0,0550	0,0717	0,0949

$D = 358$ мм

$\gamma=1{,}016\cdot10^4$ Н/м³; $S=1{,}07\%$ $C_p'=2{,}50\%$; $U_c=1{,}80$ м/с	U, м/с	1,80	2.00	2,50	3,00	3,50	4,00
	i	0,0082	0,0100	0,0135	0,0174	0,0231	0,0305
$\gamma=1{,}046\cdot10^4$ Н/м³; $S=3{,}06\%$ $C_p'=7{,}40\%$; $U_c=2{,}30$ м/с	U, м/с	2,30	2,50	3,00	3,50	4,00	—
	i	0,0127	0,0145	0,0184	0,0241	0,0315	—
$\gamma=1{,}17\cdot10^4$ Н/м³; $S=11{,}3\%$ $C_p'=24{,}2\%$; $U_c=2{,}50$ м/с	U, м/с	2,50	3,00	3,50	4,00	—	—
	i	0,0170	0,0207	0,0270	0,0331	—	—
$\gamma=1{,}23\cdot10^4$ Н/м³; $S=18{,}7\%$ $C_p'=36{,}5\%$; $U_c=2{,}00$ м/с	U, м/с	2,00	2,50	3,00	3,50	—	—
	i	0,0135	0,0185	0,0232	0,0298	—	—
$\gamma=1{,}41\cdot10^4$ Н/м³; $S=27{,}40\%$ $C_p'=48{,}50\%$; $U_c=1{,}60$ м/с	U, м/с	1,60	2,00	2,50	3,00	3,50	—
	i	0,0105	0,0147	0,0205	0,0252	0,0318	—

Золошлаковые материалы Старобешевской ГРЭС

$d_{ср} = 3{,}23$ мм $\qquad \gamma_a = 2{,}22\cdot10^4$ Н/м³

Ситовый состав

Классы, мм	>13	13—6	6—3	3—1	1,0—0,8	0,8—0,2	0,20—0,071	<0,071
Выход классов, %	3,14	6,72	21,97	45,00	7,21	8,01	3,71	4,24

$\gamma=1{,}05\cdot10^4$ Н/м³ $S=4{,}10\%$ $C_p'=8{,}67\%$ $U_c=1{,}90$ м/с	U, м/с	1,90	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
	i	0,0335	0,0346	0,0411	0,0475	0,0557	0,0664	0,0778	0,0900
$\gamma=1{,}10\cdot10^4$ Н/м³ $S=8{,}20\%$ $C_p'=16{,}55\%$ $U_c=2{,}20$ м/с	U, м/с	2,20	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	—	—
	i	0,0455	0,0511	0,0575	0,0672	0,0774	0,0888	—	—
$\gamma=1{,}15\cdot10^4$ Н/м³ $S=12{,}30\%$ $C_p'=23{,}75\%$ $U_c=2{,}50$ м/с	U, м/с	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	—	—	—
	i	0,0631	0,0695	0,0787	0,0884	0,0988	—	—	—
$\gamma=1{,}20\cdot10^4$ Н/м³ $S=16{,}40\%$ $C_p'=30{,}30\%$ $U_c=2{,}40$ м/с	U, м/с	2,40	2,50	3,00	3,50	—	—	—	—
	i	0,0725	0,0731	0,0765	0,0857	—	—	—	—
$\gamma=1{,}25\cdot10^4$ Н/м³ $S=20{,}50\%$ $C_p'=36{,}40\%$ $U_c=2{,}30$ м/с	U, м/с	2,30	2,50	3,00	3,50	4,00	—	—	—
	i	0,0385	0,0856	0,0905	0,0987	0,1074	—	—	—
$\gamma=1{,}30\cdot10^4$ Н/м³ $S=24{,}60\%$ $C_p'=42{,}00\%$ $U_c=2{,}25$ м/с	U, м/с	2,25	2,50	3,00	3,50	4,00	—	—	—
	i	0,0925	0,0971	0,1045	0,1107	0,1174	—	—	—
$\gamma=1{,}35\cdot10^4$ Н/м³ $S=28{,}70\%$ $C_p'=47{,}20\%$ $U_c=2{,}20$ м/с	U, м/с	2,20	2,50	3,00	3,50	—	—	—	—
	i	0,1020	0,1071	0,1135	0,1227	—	—	—	—
$\gamma=1{,}40\cdot10^4$ Н/м³ $S=32{,}80\%$ $C_p'=52{,}0\%$ $U_c=2{,}20$ м/с	U, м/с	2,20	2,50	3,00	3,50	—	—	—	—
	i	0,1155	0,1206	0,1245	0,1307	—	—	—	—

$D = 358$ мм

$\gamma=1{,}05\cdot10^4$ Н/м³; $S=4{,}10\%$ $C_p'=8{,}67\%$; $U_c=3{,}00$ м/с	U, м/с i	3,00 0,0272	3,50 0,0345	4,00 0,0408
$\gamma=1{,}085\cdot10^4$ Н/м³; $S=7{,}00\%$ $C_p'=14{,}31\%$; $U_c=3{,}40$ м/с	U, м/с i	3,40 0,0430	3,50 0,0445	4,00 0,0538
$\gamma=1{,}15\cdot10^4$ Н/м³; $S=12{,}30\%$ $C_p'=23{,}75\%$; $U_c=3{,}60$ м/с	U, м/с i	3,60 0,0575	4,00 0,0672	— —
$\gamma=1{,}20\cdot10^4$ Н/м³; $S=16{,}40\%$ $C_p'=30{,}30\%$; $U_c=3{,}50$ м/с	U, м/с i	3,50 0,0625	4,00 0,0748	— —

$D = 614$ мм

$\gamma=1{,}061\cdot10^4$ Н/м³; $S=5{,}00\%$ $C_p'=10{,}46\%$; $U_c=3{,}80$ м/с	U, м/с i	3,80 0,0295	4,00 0,0307	4,50 0,0347	5,00 0,0385
$\gamma=1{,}122\cdot10^4$ Н/м³; $S=10{,}0\%$ $C_p'=19{,}77\%$; $U_c=4{,}30$ м/с	U, м/с i	4,30 0,0415	4,50 0,0427	5,00 0,0480	— —
$\gamma=1{,}183\cdot10^4$ Н/м³; $S=15{,}00\%$ $C_p'=28{,}15\%$; $U_c=4{,}30$ м/с	U, м/с i	4,30 0,0535	4,50 0,0542	5,00 0,0570	— —
$\gamma=1{,}244\cdot10^4$ Н/м³; $S=20{,}00\%$ $C_p'=35{,}70\%$; $U_c=4{,}25$ м/с	U, м/с i	4,25 0,0640	4,50 0,0652	5,00 0,0700	— —
$\gamma=1{,}305\cdot10^4$ Н/м³; $S=20{,}00$ $C_p'=42{,}54\%$; $U_c=4{,}20$ м/с	U, м/с i	4,20 0,0724	4,50 0,0747	5,00 0,0790	— —

Доменные шлаки

$d_{ср} = 3{,}03$ мм $\qquad\qquad$ $\gamma_a = 2{,}50\cdot10^4$ Н/м³

Ситовый состав

Классы, мм	>13	6—13	3—6	1—3	0,5—1	<0,5
Выход классов, %	5,06	2,43	23,60	41,38	11,98	9,55

$D = 149$ мм

$\gamma=1{,}075\cdot10^4$ Н/м³; $S=5{,}00\%$ $C_p'=11{,}60\%$; $U_c=2{,}20$ м/с	U, м/с i	2,20 0,0420	2,50 0,0457	3,00 0,0562	3,50 0,0697	4,00 0,0867	4,50 0,1109
$\gamma=1{,}15\cdot10^4$ Н/м³; $S=10{,}0\%$ $C_p'=21{,}80\%$; $U_c=2{,}50$ м/с	U, м/с i	2,50 0,0633	3,00 0,0712	3,50 0,0842	4,00 0,1007	4,50 0,1249	— —
$\gamma=1{,}225\cdot10^4$ Н/м³; $S=15{,}0\%$ $C_p'=30{,}60\%$; $U_c=2{,}50$ м/с	U, м/с i	2,50 0,0783	3,00 0,0887	3,50 0,1007	4,00 0,1167	— —	— —

$D = 202$ мм

$\gamma=1{,}075\cdot10^4$ Н/м³; $S=5{,}00\%$ $C_c'=11{,}60\%$; $U_c=2{,}50$ м/с	U, м/с i	2,50 0,0374	3,00 0,0454	3,50 0,0552	4,00 0,0676
$\gamma=1{,}150\cdot10^4$ Н/м³; $S=10{,}0\%$ $C_p'=21{,}7\%$; $U_c=2{,}75$ м/с	U, м/с i	2,75 0,0605	3,00 0,0635	3,50 0,0732	4,00 0,0859
$\gamma=1{,}225\cdot10^4$ Н/м; $S=15{,}0\%$ $C_p'=30{,}60\%$; $U_c=2{,}75$ м/с	U, м/с i	2,75 0,0770	3,00 0,0785	3,50 0,0867	4,00 0,0994

$D = 358$ мм

$\gamma=1{,}038\cdot10$ Н/м³; $S=2{,}50\%$ $C_p'=6{,}02\%$; $U_c=3{,}25$ м/с	U, м/с i	3,25 0,0290	3,50 0,0302	4,00 0,0373	4,50 0,0434
$\gamma=1{,}075\cdot10^4$ Н/м³; $S=4{,}50\%$ $C_p'=11{,}60\%$; $U_c=3{,}40$ м/с	U, м'с i	3,40 0,0375	3,50 0,0380	4,00 0,0433	— —
$\gamma=1{,}113\cdot10^4$ Н/м³; $S=7{,}50\%$ $C_p'=16{,}90\%$; $U_c=3{,}50$ м/с	U, м/с i	3,50 0,0435	4,00 0,0478	— —	— —
$\gamma=1{,}150\cdot10^4$ Н/м³; $S=10{,}0\%$ $C_p'=21{,}70\%$; $S=3{,}40$ м/с	U, м/с i	3,40 0,0485	3,50 0,0490	4,00 0,0538	— —
$\gamma=1{,}188\cdot10^4$ Н/м³; $S=12{,}5\%$ $C_p'=26{,}3\%$; $U_c=3{,}40$ м/с	U, м/с i	3,40 0,0520	3,50 0,0525	4,00 0,0583	— —

Золошлаковые материалы Северодонецкой ТЭЦ

$d_{ср} = 0{,}18$ мм $\qquad \gamma_a=1{,}80\cdot10^4$ Н/м³

Ситовый состав

Классы, мм	>0,80—0,30	0,20—0,80	0,10—0,20	0,070—0,1	<0,071
Выход классов, %	5,27	9,27	9,63	7,13	68,70

$D = 104$ мм

$\gamma=1{,}16\cdot10^4$ Н/м³; $S=20{,}0\%$ $C_p'=31{,}0\%$; $U_c=1{,}0$ м/с	U, м/с i	1,0 0,0131	1,5 0,0229	2,0 0,0371	2,5 0,0546

Приложение 4

ПРИМЕРЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЗОЛОШЛАКОПРОВОДОВ

В виде иллюстрации изложенного в разделе 3 метода расчета энергетически наивыгоднейшего в заданных условиях режима гидротранспорта золошлаковой пульпы в этом параграфе приводятся два примера расчета гидротранспорта очаговых остатков от одного блока двух различных тепловых электростанций СССР.

Пример 1

Дано: весовой расход золошлака: $G_s = 47$ Н/с; гранулометрический состав золошлака; аггрегатный удельный вес золошлака $\gamma_a = 2{,}6 \cdot 10^4$, Н/м^3; трасса горизонтального золошлакопровода, длиной 1000 м.

Порядок расчета

1. На основании данных о грансоставе золошлакового материала по типу табл. 2 составляется табл. 14.

2. По формуле (11) определяется $d_{ср}$, которое согласно табл. 14 получается равным $\approx 0{,}164$ мм.

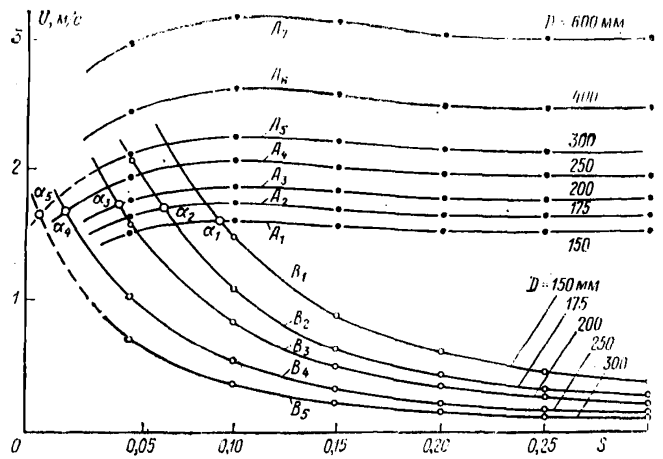

Рис. 6.

3. Для различных, произвольно выбранных в указанных (см. п. 3.19) пределах диаметров трубопровода D, задаваясь для каждого из них различными, также произвольно выбранными (п. 3.19) концентрациями S, следует, на основании п. 3.17 вычислить серию критических скоростей U_c.

4. Принимая подходящий в данных условиях «коэффициент надежности эксплуатации», например 1,1, согласно п. 3.14 следует для каждой U_c вычислить соответствующие скорости U: $U = 1{,}1 U_c$.

5. Для каждого диаметра трубопровода следует построить график зависимости U от S (рис. 6, кривые A_1, A_2, $A_3 \ldots A_5$).

6. Пользуясь табл. 1 и принятым отношением $U : U_c$, следует для каждой S вычислить, для выбранных диаметров трубопроводов, соответствующие им расходные консистенции C_p.

Таблица 14

Порядковый номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Крупность зерен, d, мм	<0,01	0,01—0,02	0,02—0,04	0,04—0,10	0,100—0,125	0,125—0,250	0,250—0,500	0,500—1,000	1—2	2—3	3—5	5—7	7—10
d_i	0,01	0,03		0,075	0,175		0,375	0,750	1,5	2,5	4,0	—	8,5
n_i	0,032	0,32		0,267	0,247		0,105	0,005	0,02	0,002	0,001	—	0,001
$d_i n_i$	0,0003	0,0096		0,020	0,043		0,039	0,004	0,03	0,005	0,004	—	0,009
$\sum_1^m d_i n_i$	0,0003	0,0099		0,299	0,0729		0,1119	0,1159	0,1459	0,1509	0,1549	—	0,1639
$\sum_1^m n_i$	0,032	0,352		0,619	0,866		0,971	0,976	0,996	0,998	0,998	—	1,000

$$d_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^m d_i n_i}{\sum_1^m n_i} = \frac{0{,}1639}{1{,}0} = 0{,}164 \text{ мм}.$$

Таблица 15

D, м	S	U, м/с	$Q_{\text{ж}}$, м³/с	$G_{\text{ж}}$, Н/с	$d_{\text{кп}}$, мм	S_1	S_2	λ	$G_{\text{ж}}+G_s/\Delta$, Н/с	l_1	l_2	$l=l_1+l_2$	(N_f), Вт	$(N_f)_{1000}$, кВт	H_{1000}, м
0,150	0,092	1,60	0,0260	260	0,52	0,089	0,003	0,0166	282	0,0164	0,0018	0,0182	5,14	5,14	18,2
0,175	0,067	1,70	0,0386	386	0,56	0,065	0,002	0,0158	408	0,0147	0,0011	0,0158	6,46	6,46	15,8
0,200	0,044	1,72	0,0518	518	0,56	0,043	0,001	0,0153	540	0,0124	0,0005	0,0129	6,97	6,97	12,9
0,250	0,020	1,70	0,0815	815	0,55	0,0195	0,0005	0,0145	833	0,0088	0,0003	0,0091	7,56	7,56	9,1
0,300	0,005	1,65	0,1150	1150	0,54	0,005		0,0141	1168	0,0066	0	0,0066	7,70	7,70	6,6

7. Для каждой консистенции C_p, для выбранных диаметров трубопровода, следует определить соответствующие объемные расходы воды Q_w (п. 3.5):

$$Q_w = \frac{1-C_p}{C_p} Q_s = \frac{1-C_p}{C_p} \frac{G_s}{\gamma_s}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

8. По каждому Q_w следует вычислить $U : U = (Q_w + Q_s) : F$.

Эти скорости следует нанести в том же масштабе на график рис. 6 (кривые $B_1, B_2, \ldots B_5$) в функции от S.

9. На графике рис. 6 точки $\alpha_1, \alpha_2, \ldots \alpha_5$ определены пересечением кривых $A_1, \ldots A_5$ с соответственными кривыми $B_1, \ldots B_5$ и представляют реально осуществимые комбинации величин: D — U — S, приведенные в табл. 15.

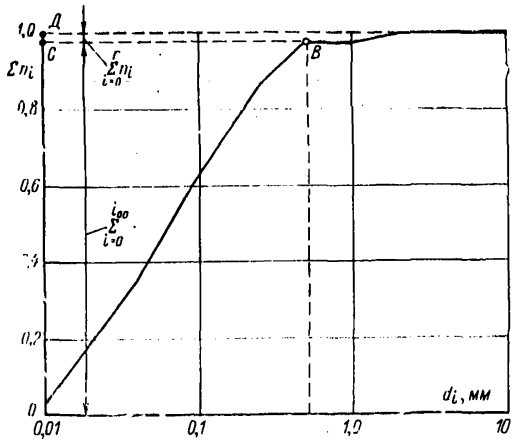

Рис. 7.

10. Объемный Q_w и весовой G_w расходы воды для режимов, определенных точками $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, вычисляются по формулам:

$$Q_w = UF - Q_s \text{ м}^3/\text{с}; \qquad G_w = \gamma_w \cdot Q_w \text{ Н/с}$$

и приведены в табл. 15.

11. По формуле 8 п. 2.3 для каждого U определяются граничные гидравлические крупности W_{00} и по табл. 3 соответствующие им геометрические крупности d_{00} (табл. 15).

12. На интегральной кривой гранулометрического состава (рис. 7) ординатой C определяется положение точки B, соответ-

ствующее найденному d_{00}, при этом на оси ординат отрезок $OD = 1$ делится на части OC и CD, выражающие соответственно $\sum_{i=0}^{i_{\infty}} n_i$ и $\sum_{i_{\infty}}^{m} n_i$, дающие согласно п. 2.5 (табл. 15) $S_1 = S\sum_{i=0}^{i_{\infty}} n_i$ и $S_2 = S\sum_{i_{\infty}}^{m} n_i$.

13. Как видно из табл. 15, при реально существующем на данной ТЭС трубопроводе диаметра $D = 350$ мм около 98% всего золошлака, состоящего главным образом из золы, относятся к пер-

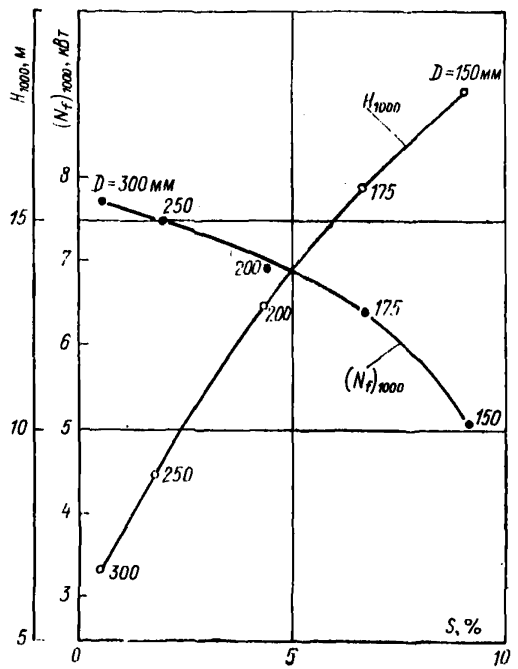

Рис. 8.

вой группе $S \approx S_1$ и в смеси с водой образует суспензию, поток которой поглощает мощность N_{f1}, определяемую первым слагаемым формулы п. 3.9, которая для трубопровода, образованного трубами одного диаметра D, дает на погонном метре длины трубы мощность N_{f1}, равную:

$$N_{f1} = \left(G_w + \frac{G_s}{\Delta}\right)\lambda \frac{1}{D}\frac{U^2}{2g}\,[1 + (\Delta - 1)\,S],\ \text{Вт}.$$

Табл. 15 содержит мощность $(N_f)_{1000}$, поглощаемую 1000 метрами длины трубы на работу сил гидравлического трения потока золошлаковой гидросмеси о стенки стальной трубы. На рис. 8

мощность $(N_f)_{1000}$ представлена в виде зависимости от S при D как параметре.

Как следует из рис. 8 наименьшим мощностям $(N_f)_{1000}$ соответствует диаметр трубы $D=150$ мм, как нижний предел значений D, указанный в п. 3.19. Это диаметр, отвечающий наименьшей металлоемкости системы ГЗУ и одновременно позволяющий пропускать куски шлака. Расчетные скорости потока при транспорте золы полностью гарантируют трубопровод от значительного истирания, что приближает выбранный энергетически наивыгоднейший режим к режиму, наивыгоднейшему экономически, выбор которого выходит за рамки задач этих рекомендаций. Этому диаметру трубопровода согласно табл. 15 соответствует напор 18,2 м, создание которого легко осуществляется выпускаемыми в настоящее время насосами.

14. Принятая на основании вышеизложенного мощность $(N_f)_{1000}$ складывается с мощностями $N_1 \dots N_3$ согласно п. 3.12 для получения суммарной мощности N_{ws}.

15. Согласно п. 3.13 вычисляется мощность N золошлакового насоса.

16. По формуле п. 3.8 вычисляется напор насоса H, соответствующий мощности N и весовому расходу пульпы.

17. Выбор насоса, отвечающего требуемым мощности N и напору H, производится по каталогам, с учетом необходимости пересчета характеристик насоса с воды на золошлаковую пульпу, условий всасывания и кавитации, согласно разделу 4 настоящих «Рекомендаций».

Пример 2

Дано: весовой расход золошлака $G_s=55{,}6$ Н/с; гранулометрический состав золошлака; агрегатный удельный вес золошлака (в плотном теле) $\gamma_a=2{,}52\cdot10^4$ Н/м^3; трасса горизонтального золошлакопровода длиной 1000 м.

Порядок расчета

1. На основании данных о грансоставе золошлакового материала по типу табл. 2 составляется табл. 16.

2. Для различных, произвольно (п. 3.19) выбранных диаметров трубопровода D, задаваясь для каждого из них различными, также произвольно (п. 3.19), выбранными концентрациями S, следует, на основании п. 3.17 вычислить серию критических скоростей U_c.

3. Принимая подходящий в данных условиях «коэффициент надежности эксплуатации», например 1.1, согласно п. 3.14 следует для каждой U_c вычислить соответствующие скорости:

$$U=1{,}1U_c \text{ м/с}.$$

Таблица 16

Порядковый номер (l)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Крупность зерен, d, мм	30—20	10—5	5—2	2—1	1—0,25	0,25—0,125	0,125—0,1	0,1—0,04	0,04—0,01
d_l	25	7,5	3,5	1,5	0,62	0,187	0,112	0,07	0,025
n_l	0,026	0,096	0,152	0,102	0,036	0,058	0,035	0,12	0,375
$d_l n_l$	0,65	0,72	0,532	0,153	0,022	0,011	0,004	0,008	0,009
$\sum_{l}^{m} d_l n_l$	0,65	1,37	1,902	2,055	2,077	2,088	2,092	2,100	2,109
$\sum_{l}^{m} n_l$	1,00	0,974	0,878	0,726	0,624	0,588	0,530	0,495	0,37

$$d_{ср} = 2{,}11 \text{ мм}.$$

4. Для каждого диаметра трубопровода следует построить график зависимости U от S (рис. 9, кривые A_1, A_2, $A_3 \ldots A_5$).

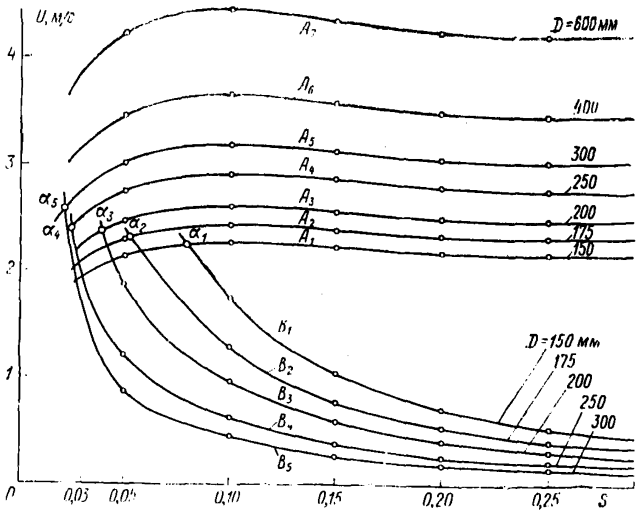

Рис. 9.

5. Пользуясь табл. 1 и принятым отношением $U = 1{,}1U_c$ следует для каждой концентрации S вычислить для выбранных диаметров трубопроводов, соответствующие им расходные консистенции $C_р$.

6. Для каждой консистенции $C_р$ для выбранных диаметров трубопроводов следует определить соответствующие объемные расходы воды Q_w (п. 3.5):

$$Q_w = \frac{1 - C_р}{C_р} Q_s = \frac{1 - C_р}{C_р} \frac{G_s}{\gamma_s}, \quad м^3/с.$$

7. По каждому Q_w следует вычислить

$$U = \frac{Q_w + Q_s}{F}, \quad \text{м/с}.$$

Эти скорости следует нанести в том же масштабе на график (рис. 9), кривые $B_1, B_2 \ldots B_5$ в функции от S.

8. На графике рис. 9 точки $\alpha_1 \ldots \alpha_5$ определены перечислением кривых $A_1 \ldots A_5$ с соответственными кривыми $B_1 \ldots B_5$ и определяют реально осуществимые комбинации величин $D—U—S$, приведенные в табл. 17.

9. Объемный Q_w и весовой G_w расходы воды для режимов, определенных точками $\alpha_1 \ldots \alpha_5$, вычисляются по формулам:

$$Q_w = UF - Q_s; \qquad G_w = \gamma_w Q_w$$

и приведены в табл. 17.

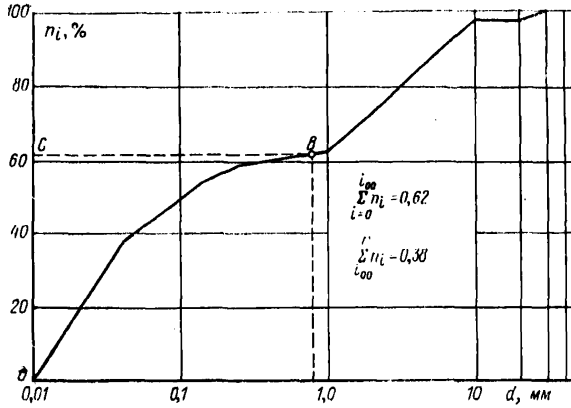

Рис. 10.

10. По формуле п. 2.3 для каждого U определяются граничные гидравлические крупности W_{00} и по табл. 3, соответствующие им геометрические крупности d_{00} (табл. 17).

11. На интегральной кривой гранулометрического состава (рис. 10) ординатой C определяется положение точки B, соответствующее найденному d_{00}; при этом на оси ординат отрезок $OD = 1$ делится на две части OC и CD: выражающие соответственно $\sum_{0}^{i_{00}} n_i$ и $\sum_{i_{00}}^{m} n_i$, по которым находятся $S_1 = S \sum_{i=1}^{i_{00}} n_i$ и $S_2 \sum_{i_{00}}^{m} n_i$, согласно п. 2.5 (табл. 17).

12. Как видно из табл. 17, при реально существующем на данной ТЭС трубопроводе диаметра $D = 350$ мм, около 62% золо-

D, м	S	U, м/с	Q_w, м³/с	G_w, Н/с	d_{00}, мм	S_1	S_2
0,150	0,081	2,26	0,0378	378	0,79	0,050	0,031
0,175	0,054	2,32	0,0534	534	0,81	0,034	0,020
0,200	0,040	2,36	0,0720	720	0,83	0,025	0,015
0,250	0,027	2,42	0,1096	1096	0,84	0,017	0,010
0,300	0,023	2,57	0,1793	1793	0,89	0,014	0,009

$d_{02} = 0{,}0054$ м

$$\sum_{0}^{i_{00}} n_i = 0{,}62$$

шлака относится к первой группе, образующей в смеси с водой суспензию, а 38% — ко второй. Следовательно мощность, погло-

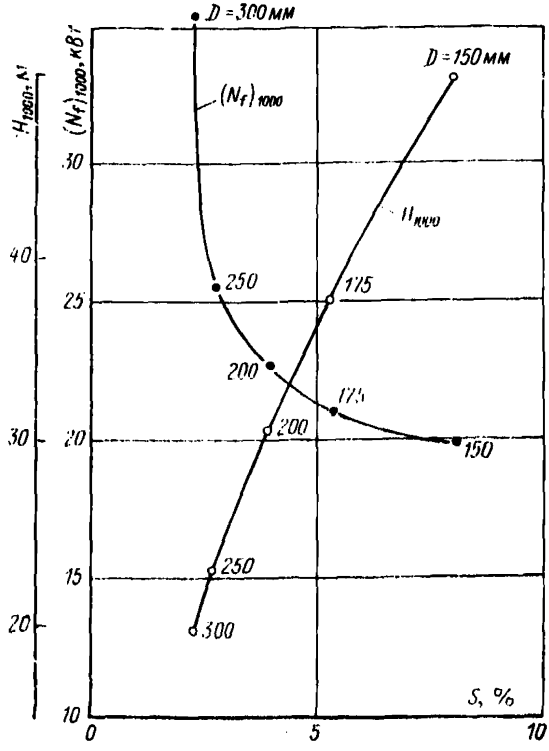

Рис. 11.

щаемая потоком на единице его длины, состоит из двух слагаемых и определяется формулой п. 3.9 (для трубопровода, образованного трубами одного диаметра D), имеющей следующий вид:

Таблица 17

λ	$G_w+\frac{G_s}{\Delta}$, Н/с	l_1	l_2	$l=l_1+l_2$	(N_f), Вт	$(N_f)_{1000}$, кВт	H_{1000}, м
0,0155	400	0,0300	0,0193	0,493	19,7	19,7	49,3
0,0149	556	0,0254	0,0121	0,0374	20,8	20,8	37,4
0,0142	742	0,0214	0,0090	0,0304	22,5	22,5	30,4
0,0137	1118	0,0170	0,0058	0,0228	25,5	25,5	22,8
0,0131	1815	0,0146	0,0050	0,0196	35,6	35,6	19,6

$W_{02} = 0{,}3$ м/с

$$\sum_{l_{00}}^{m} n_l = 0{,}38$$

$$N_{f1} = \left(G_w + \frac{G_s}{\Delta}\right)\left\{ [1 + (\Delta - 1) S_1]\, \lambda\, \frac{1}{D}\, \frac{U^2}{2g} + \frac{W_{02}^2}{g d_{02}}\left[0{,}04 + \frac{2{,}5 W_{02}}{U}\right] S_2 \right\}, \text{ Вт.}$$

где d_{02} определяется для 2-й группы взвеси, согласно формуле п. 2.4, а W_{02} находится по табл. 3, соответственно найденному d_{02}.

В табл. 17 и на рис. 11 дана мощность $(N_f)_{1000}$, поглощаемая на 1000 м длины трубопровода, а также напор H_{1000}, соответствующий той же длине трубы, вычисленный по формуле п. 3.8.

13. Как следует из табл. 17 диаметрам труб 150 и 175 мм соответствуют приблизительно одинаковые мощности $(N_f)_{1000}$, однако, при установке труб диаметром 175 мм потребный напор насоса по сравнению с трубами диаметром 150 мм падает с 50 до 38 метров, что в ряде случаев представляет значительное преимущество и окупает несколько более высокую металлоемкость системы ГЗУ.

Таблица обобщенных данных гидравлического расчета гидротранспорта золошлаковых материалов для 2-х частных случаев:

1) $\gamma_{зш} \approx 3{,}1 \cdot 10^4$, Н/м³; $d_{ср} \approx 3{,}42$ мм
2) $\gamma_{зш} \approx 2{,}3 \cdot 10^4$, Н/м³; $d_{ср} \approx 3{,}42$ мм

Таблица 18

D, м	$P_т$=40 т/ч		$P_т$=60 т/ч		$P_т$=100 т/ч		$P_т$=200 т/ч		$P_т$=400 т/ч	
	$\frac{1000i}{Q_w}$, м³/с	кВт	$\frac{1000i}{Q_w}$, м³/с	кВт	$\frac{1000i}{Q_w}$, м/с³	кВт	$\frac{1000i}{Q_w}$, м³/с	кВт	$\frac{1000i}{Q_w}$, м³/с	кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\gamma_{зш} = 3{,}1 \cdot 10^4$ Н/м³; $d_{ср} = 3{,}42$ мм										
0,150	$\frac{85}{0{,}0396}$	36,7	$\frac{105{,}5}{0{,}0378}$	45,6	$\frac{147{,}4}{0{,}0324}$	61,0	—	—	—	—
0,200	$\frac{54{,}3}{0{,}0824}$	46,7	$\frac{64{,}6}{0{,}0822}$	56,6	$\frac{83{,}7}{0{,}0786}$	73,3	$\frac{127{,}8}{0{,}0662}$	107,5	—	—
0,250	$\frac{40{,}5}{0{,}1398}$	58,1	$\frac{46{,}6}{0{,}1434}$	69,3	$\frac{59{,}0}{0{,}1432}$	89,8	$\frac{82{,}5}{0{,}1332}$	124,7	$\frac{128{,}7}{0{,}1103}$	188
0,300	$\frac{31{,}5}{0{,}2096}$	67,2	$\frac{36{,}5}{0{,}2177}$	77,8	$\frac{44{,}5}{0{,}2254}$	104,3	$\frac{61{,}4}{0{,}2220}$	147,3	$\frac{89{,}1}{0{,}1998}$	209,9
0,350	$\frac{24{,}4}{0{,}2831}$	70,0	$\frac{29{,}0}{0{,}3015}$	89,0	$\frac{36{,}0}{0{,}3200}$	121,7	$\frac{49{,}4}{0{,}3293}$	171,5	$\frac{67{,}4}{0{,}3171}$	237,8
0,400	—	—	$\frac{24{,}0}{0{,}3940}$	95,9	$\frac{30{,}2}{0{,}4306}$	132,8	$\frac{39{,}9}{0{,}4568}$	189,4	$\frac{54{,}2}{0{,}4564}$	266,8
0,450	—	—	—	—	$\frac{25{,}2}{0{,}5586}$	143,0	$\frac{34{,}0}{0{,}6037}$	211,3	$\frac{45{,}1}{0{,}6175}$	294,6
0,500	—	—	—	—	$\frac{22{,}2}{0{,}6954}$	156,4	$\frac{29{,}4}{0{,}7727}$	232,4	$\frac{39{,}4}{0{,}7998}$	329,2
0,550	—	—	—	—	—	—	$\frac{26{,}9}{0{,}9605}$	263,2	$\frac{34{,}7}{1{,}0066}$	361,7
0,600	—	—	—	—	—	—	$\frac{23{,}3}{1{,}1576}$	273,9	$\frac{30{,}1}{1{,}2300}$	381
$\gamma_{зш} = 2{,}3 \cdot 10^4$ Н/м; $d_{ср} = 3{,}42$ мм										
0,150	$\frac{67{,}7}{0{,}0338}$	26,1	$\frac{83{,}7}{0{,}0302}$	31,4	—	—	—	—	—	—
0,200	$\frac{44{,}6}{0{,}0743}$	35,3	$\frac{52{,}6}{0{,}0718}$	41,6	$\frac{67{,}3}{0{,}0655}$	52,2	—	—	—	—

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,250	33,3 / 0,1292	44,6	38,9 / 0,1302	53,5	47,2 / 0,1269	65,6	6,66 / 0,1094	89,0	—	—
0,300	26,0 / 0,1950	51,9	31,1 / 0,2024	65,2	37,9 / 0,2046	82,1	49,0 / 0,1925	106,2	71,8 / 0,1595	149,5
0,350	21,4 / 0,2723	59,3	25,4 / 0,2880	75,0	30,6 / 0,2986	95,1	39,5 / 0,2952	126,2	54,0 / 0,2623	167,7
0,400	17,1 / 0,3585	62,1	21,3 / 0,3846	83,5	25,7 / 0,4087	108,1	33,1 / 0,4179	146,3	43,3 / 0,3950	192,0
0,450	—	—	18,2 / 0,4904	90,6	21,7 / 0,5285	117,3	28,4 / 0,5577	165,3	36,1 / 0,5463	214,6
0,500	—	—	15,7 / 0,6068	96,4	19,0 / 0,6609	127,9	24,9 / 0,7155	184,2	32,0 / 0,7227	246,7
0,550	—	—	—	—	17,6 / 0,8073	144,2	21,6 / 0,8902	197,5	28,2 / 0,9230	273,9
0,600	—	—	—	—	15,5 / 0,9685	152	19,3 / 1,0779	212,7	25,1 / 1,1442	299,3

Примечание: $P_т$ — выход твердого вещества на ТЭС.

Приложение 6

Пересчет характеристики центробежного насоса с воды на золошлаковую гидросмесь

Дано: характеристика центробежного насоса при работе на воде (рис. 2).

Необходимо пересчитать характеристики насоса с воды на золошлаковую гидросмесь с объемной концентрацией $S=0{,}2$ и $\gamma_а=2\cdot10^4$ Н/м³.

1. Определяем коэффициент напора (п. 4.4.).

$$k_н=1-0{,}6\,S=0{,}88.$$

2. Из табл. 5 находим коэффициент мощности $k_N=0{,}983$.

3. Рассчитываем величину коэффициента k_η (п. 4.6).

$$k_\eta=\frac{0{,}88}{0{,}983}=0{,}895.$$

4. Удельный вес гидросмеси

$$\gamma=\gamma_в\left[1+(\Delta-1)\,S\right]=1{,}2\cdot10^4\ \text{Н/м}^3.$$

5. Напор насоса при работе на гидросмеси

$$H = k_H [1 + (\Delta - 1) S] H_w = 1{,}055 H_w.$$

6. Мощность насоса при работе на гидросмеси

$$N = k_N [1 + (\Delta - 1) S] N_w = 1{,}18 N_w.$$

7. КПД насоса при работе на гидросмесь

$$\eta = k_\eta \cdot \eta_w = 0{,}895 \eta_w.$$

Результаты пересчета сведены в табл. 19.

Таблица 19

Параметры	Производительность насоса, м³/ч									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
H_w, м вод. ст.	95	90	90	90	85	85	81	78	67	36
N_w, кВт	139	164	177	190	230	242	268	293	295	293
η_w	0,20	0,33	0,44	0,55	0,62	0,63	0,69	0,69	0,63	0,56
H, м вод. ст.	101	95	95	95	90	90	86	83	71	38
N, кВт	164	194	210	224	243	288	316	345	350	345
η	0,18	0,30	0,39	0,49	0,55	0,56	0,62	0,62	0,56	0,50

СОДЕРЖАНИЕ

1. Основные положения 3
2. Золошлаковый материал 5
3. Расчет мощности и напора в системах напорного гидротранспорта золошлаковых материалов 8
4. Выбор насоса и расчет рабочих режимов гидротранспортных установок 13

Приложение 1 19
Приложение 2 21
Приложение 3 34
Приложение 4 40
Приложение 5 50
Приложение 6 51

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ СИСТЕМ НАПОРНОГО ГИДРОТРАНСПОРТА ЗОЛОШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

П 61—77

ВНИИГ

Научный редактор
М. А. Дементьев

Редактор *Л. Г. Сетко*

Технический редактор *Т. М. Бовичева*

Сдано в набор 25/V 1977 г.
Подписано к печати 19/VIII 1977 г.
М-21740.
Формат 60×90/16.
Бумага типографская № 1.
Печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,84.
Тираж 980. Заказ 287. Цена 43 к.

Типография Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева.
195220, Ленинград, Гжатская ул., 21.

gost.e-ecolog.ru