

TALLINNA POLÜTEHNILISE
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А

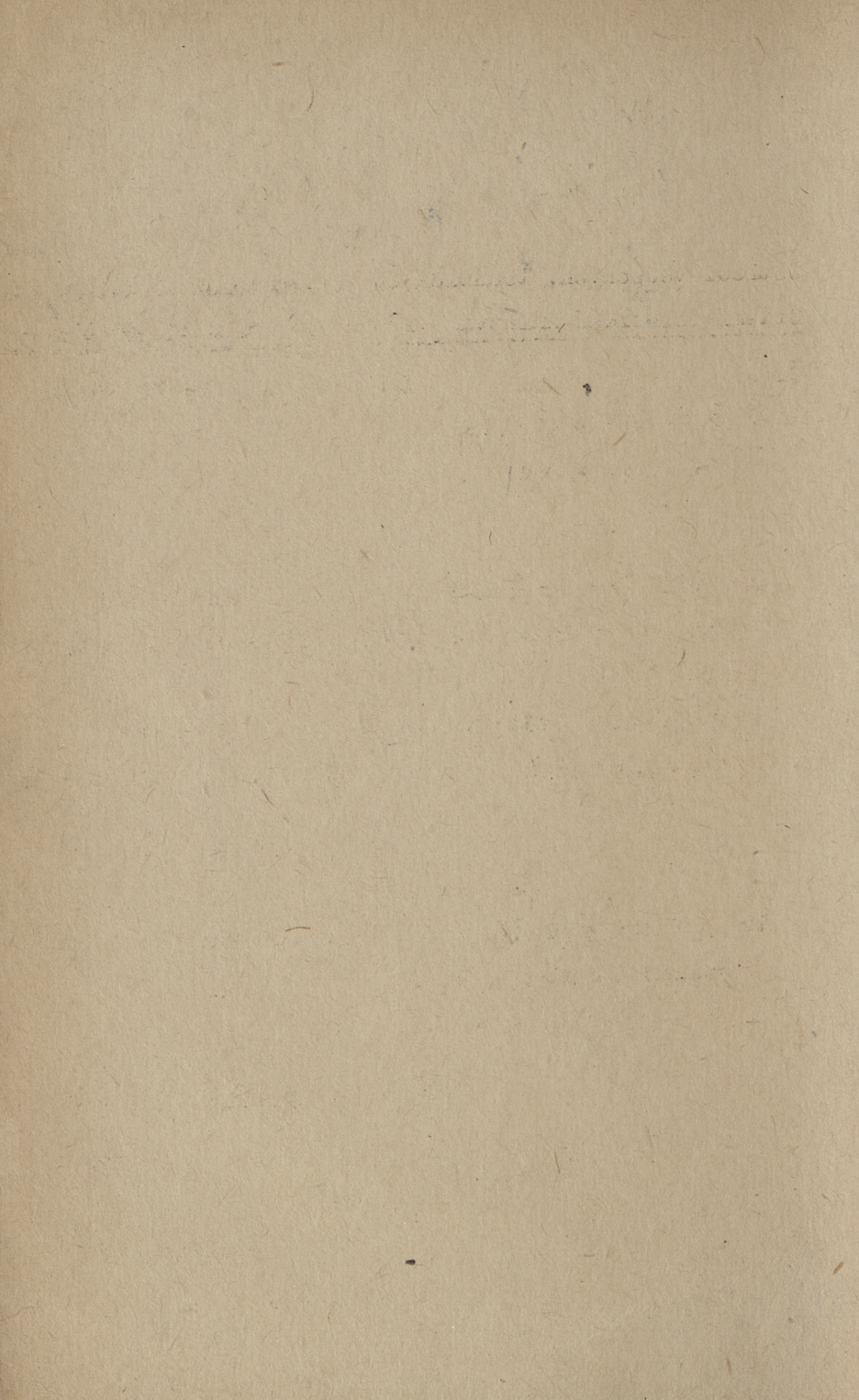
№ 232

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

СБОРНИК СТАТЕЙ

V

Под общей редакцией проф. И. П. Эпика



Er. 6. 1

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

С Е Р И Я А

№ 232

1966

УДК 621.180

Т Е П Л О Э Н Е Р Г Е Т И К А

СБОРНИК СТАТЕЙ

V

Под общей редакцией
проф. И.П. ЭПИКА

Таллин
1966



Ep. 7168

УДК 621.18

537.09

И.Р. Микк

СИСТЕМАТИЗИРОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ГЕОМЕТРИЧЕСКО-
ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ТРУБНЫХ ПУЧКОВ

В котельных агрегатах и в других теплообменных устройствах поверхности нагрева выполняются часто в виде трубных пучков. Заполняющие межтрубное пространство продукты сгорания отдают тепло трубам путем конвекции и излучением. Величина лучистых потоков определяется температурами газов и стенок труб, а также значениями степеней черноты газового потока и поверхности труб. Как известно, степень черноты излучающего газового слоя определяется физическими свойствами газов, его эффективной толщиной слоя. Для монохроматического или серого равновесного излучения эта зависимость выражается следующей формулой:

$$\varepsilon = 1 - D, \quad (1)$$

где коэффициент пропускания среды D определяется по формуле

$$D = \exp(-kS_{\text{эфф}}), \quad (2)$$

где k — коэффициент поглощения, зависящий от физических свойств среды,

$S_{\text{эфф}}$ — эффективная толщина излучающего слоя.

При рассмотрении излучения и поглощения в среде по одномерной схеме $S_{\text{эфф}}$ равняется длине луча. Однако для

сложных геометрических систем длины лучей, которые падают на рассматриваемую поверхность по разным направлениям, разные. Поэтому коэффициент пропускания D определяется как интегральное среднее от значений D , полученных по разным направлениям падающих лучей. Для простейших геометрических систем имеются аналитические решения для D , рассмотренные в [1]. Для трубных пучков, однако, зависимость длины луча является крайне сложной функцией от направления и вычисление D возможно только при помощи численного интегрирования.

Из-за трудоемкости вычисления D путем численного интегрирования, первые результаты были опубликованы лишь в 1937 г. Эккертом [2], а до этого отсутствовали всякие обоснованные методы расчета лучистого теплообмена в трубных пучках. В упомянутой работе рассмотрены по геометрическим признакам три варианта трубных пучков. Сначала задача была приведена к двумерной путем численного определения первого интеграла, а затем табулированные значения первого интеграла были применены для определения D путем численного интегрирования.

Вычислялись значения D при четырех значениях оптической плотности среды для каждого варианта пучка. Среда была рассмотрена как серая, поверхности труб — как абсолютно черные.

Аналогичные результаты были опубликованы также в работе М.А. Стрыковича и Р.С. Берштейна [3] в 1941 г. Эта работа отличалась от работы [2] тем, что в ней рассматривалось поглощение в газовой среде по номограммам Хоттеля-Мангелсдорфа и результаты численного интегрирования были представлены в виде графиков.

Работы [2, 3] являлись до последнего времени первоисточником, на основе которого были разработаны методы расчета лучистого теплообмена в трубных пучках. Однако из-за крайней трудоемкости численного интегрирования авторы

этих работ не могли широко варьировать геометрическими характеристиками трубного пучка. Поэтому в результате этих работ получены данные только для пучков, имеющих, примерно, равные шаги между трубами.

Данные об определении D для трубных пучков путем численного интегрирования значительно дополнились опубликованием наших работ [4, 5] в 1963 г. Эти работы отличались от прежних главным образом тем, что для численного интегрирования применялись современные электронно-цифровые вычислительные машины (ЭВМ). Поэтому оказалось возможным исследовать трубные пучки с очень широким диапазоном геометрических характеристик. Кроме того, задача была приведена к двумерной в аналитическом виде согласно результатам работы [6].

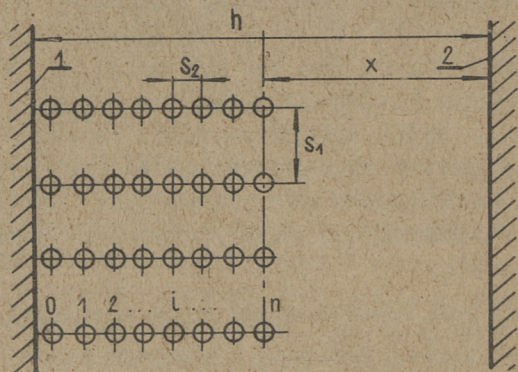
Недостатки всех вышеупомянутых работ следующие:

1. Рассматривается излучение в неограниченном трубном пучке. Следовательно, отсутствуют данные, позволяющие оценить влияние стенок и соседних газовых объемов на лучистый теплообмен в пучке.

2. Опубликованы данные о средних значениях D по периметру трубы. Отсутствуют данные о локальных значениях D по периметру трубы, а также данные об обобщенных угловых коэффициентах в трубных системах. Поэтому на основе этих данных невозможно исследовать локальную теплоотдачу.

В связи с этим нами была проведена в 1964 г. еще одна работа по численному интегрированию D для трубного пучка, результаты которой публикуются в данной статье впервые. Эта работа характеризуется очень большим объемом вычислительных работ, которые проводились на ЭВМ "Урал-4". Были получены результаты для 65 вариантов, отличающихся по геометрическим характеристикам и по оптической плотности среды. В работе было сделано более $3 \cdot 10^9$ вычислительных операций и машина напечатала более 100000 чисел (вместе с промежуточными данными интегрирования).

Вычисления были проведены по тем же формулам, которые использовались в работах [5, 6], однако схема трубного пучка была выбрана согласно фиг. 1. Ввиду того, что эта система имеет в одном направлении конечные габаритные размеры, длина луча определяется либо пересечением луча с трубами, либо



Фиг. 1. Схема коридорного трубного пучка, имеющего в одном направлении конечные габаритные размеры

пересечением его с одной из стенок. Поэтому численное интегрирование производилось в следующем порядке:

I. Определялись локальные обобщенные угловые коэффициенты $\Psi_{\alpha,1}$, $\Psi_{\alpha,2}$, $\Psi_{\alpha,T}$ как равные вероятности того, что испускаемый из точки P квант (см. фиг. 2) доходит соответственно до поверхности 1 и 2 или до поверхности остальных труб, по формуле

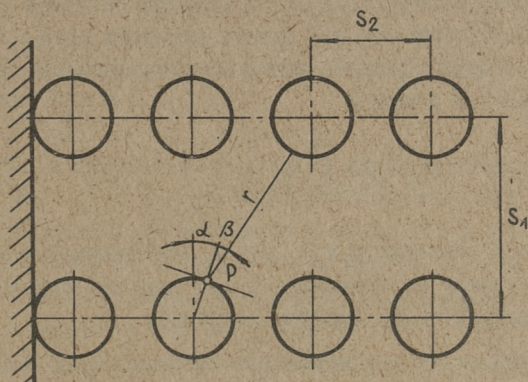
$$\Psi_{\alpha} = \frac{1}{2} \int M(kr) d\sin\beta, \quad (3)$$

где функция M получается приведением задачи к двумерной и определяется в [1], а длина луча r и угол β показаны на фиг. 2. Область интегрирования, которая согласно фиг. 2 определяется условием

$$-\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq +\frac{\pi}{2}$$

была поделена на три части в зависимости от того, пересека-

ется ли луч (r) со стенкой 1, 2 или с другими трубами системы.



Фиг. 2. Схема с обозначениями к определению характеристик численным интегрированием.

2. Коэффициент пропускания среды D_α в точке P на рассматриваемой трубе i была определена как сумма

$$D_\alpha = \Psi_{\alpha,1} + \Psi_{\alpha,2} + \Psi_{\alpha,\Gamma} . \quad (4)$$

3. Определялись интегральные обобщенные угловые коэффициенты для i -ой трубы $\Psi_{i,1}$, $\Psi_{i,2}$ и $\Psi_{i,\Gamma}$, равные вероятности того, что испускаемый i -ой трубой квант доходит соответственно до поверхности 1 и 2 или до поверхности труб, по формуле

$$\Psi_i = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \Psi_\alpha d\alpha , \quad (5)$$

а также среднее значение коэффициента поглощения при излучении среды на i -ую трубу

$$D_i = \Psi_{i,1} + \Psi_{i,2} + \Psi_{i,\Gamma} . \quad (6)$$

4. Определялись средние значения обобщенных угловых коэффициентов $\psi_{\text{ср},1}$, $\psi_{\text{ср},2}$, $\psi_{\text{ср},\tau}$ и среднее значение коэффициента поглощения $D_{\text{ср}}$ для целого трубного ряда, состоящего из $n + 1$ труб. Среднее значение этих величин определяется по простой формуле

$$\psi_{\text{ср}} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n \psi_i, \quad (7)$$

однако так как значения ψ_i и D_i из-за сокращения объема вычислительных работ не вычислялись для каждого значения i , то была применена снова формула Симпсона.

Все рассмотренные в пунктах 1-4 величины были отпечатаны ЭВМ как результаты вычисления.

Из вышеприведенного следует, что в настоящее время имеется уже значительное количество данных, характеризующих оптико-геометрические свойства излучающих систем, составленных из труб и плоскостей с абсолютно черными поверхностями и с серой, заполняющей межтрубное пространство среды. Эти данные могут быть успешно применены для решения различных задач, а также для разработки методов расчета лучистого теплообмена.

В данной работе сделана попытка представить эти данные в нижеследующих таблицах в систематизированном виде. При этом они частично обработаны и даются в более пригодном для применения виде. Дополнительные объяснения к приведенным таблицам следующие:

В таблицах 1, 2 и 3 приводятся основные геометрическо-оптические характеристики рассмотренных вариантов, характеристический оптический размер ks_0 для бесконечного пучка, определяемый по формуле

$$ks_0 = \left(\frac{4}{\pi} \frac{S_1}{d} \frac{S_2}{d} - 1 \right) kd \quad (8)$$

и средний коэффициент пропускания среды D для трубы в бесконечном пучке. В таблице I приводятся также значения D для тех вариантов, у которых n достаточно большое (см. фиг. I), чтобы в середине пучка, при $i = \frac{n}{2}$, обеспечивалось бы тождество $D_{\frac{n}{2}} = D$.

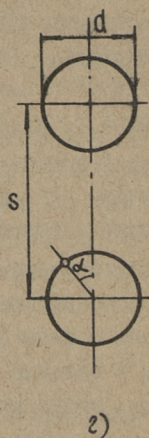
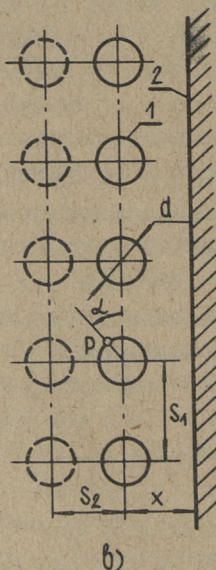
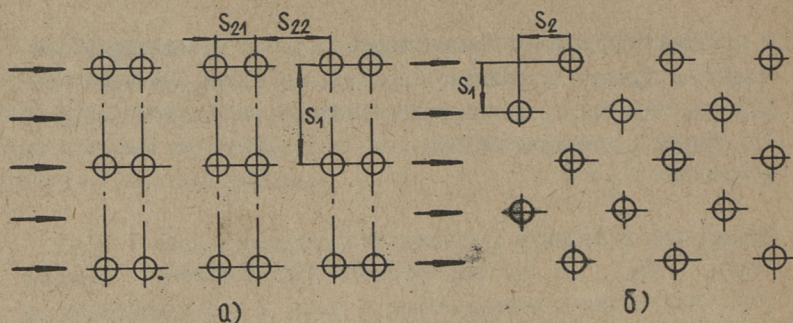
Кроме того в таблице I приводятся средние данные $\Psi_{ср,1}$, $\Psi_{ср,2}$, $\Psi_{ср,г}$ и $D_{ср}$ для трубного ряда согласно формуле (7). Объяснения к обозначениям в табл. 2 и 3 приводятся на фиг. 3-а и 3-б. В последней графе таблиц I-3 приводятся данные об источнике; номера соответствуют перечню литературы, крестиком отмечены еще не опубликованные, вычисленные на "Урал-4" варианты. Отметим, что еще не опубликована часть данных, полученных после опубликования работы [5]. Эти данные отмечены в табл. I-3, как взятые из работы [5].

В таблице 4 приводятся значения среднего коэффициента пропускания среды D_i для коридорного пучка с конечным числом $n + 1$ труб в одном ряде (см. фиг. I).

В таблицах 5 и 6 даны значения локального коэффициента пропускания среды при излучении на поверхность трубы D_{α} для средней трубы в ряде ($i = \frac{n}{2}$). В таблицах приводятся только варианты с большим значением n , так что приведенные значения D_{α} можно рассматривать как для бесконечного пучка.

В таблице 7 представлены данные о D_{α} при $i = 0$ и $i = n$ в переработанном виде согласно фиг. 3в. Согласно схеме на фиг. 3в все значения D_{α} определяются для трубного ряда, в соседстве с которым находится излучающий слой, ограниченный с другой стороны плоской стенкой.

В таблице 8 приводятся данные о локальных и средних обобщенных угловых коэффициентах $\Psi_{\alpha,12}$ и $\Psi_{i,12}$ при $i = 0$ и $i = n$ от трубы на плоскую стенку. Эти данные также переработаны согласно фиг. 3в и, следовательно, все значения определяются для трубного ряда, в соседстве с которым на-



Фиг. 3. Схемы к таблицам 1-9

ходится излучающий слой, ограниченный с другой стороны плоской стенкой.

В таблице 9 приводятся значения локальных и средних обобщенных угловых коэффициентов $\Psi_{\alpha, T-T}$ и Ψ_{T-T} между двумя трубами с параллельными осями. Данные табл. 9 получены путем переработки отпечатанных ЭВМ результатов вычислений. Обозначения объясняются на фиг. 3г

Сводная таблица вариантов коридорного пучка труб и средние значения
геометрическо-оптических характеристик. Обозначения см. фиг. I

№	$\frac{S_1}{D}$	$\frac{S_2}{D}$	KS ₁	n	$\frac{h}{S_1}$	KS ₀	7	8	9	10	D _{ср}	D	Источ- ник	
													I2	I3
I	1,5	1,5	0,015	5	6	7							I2	I3
I	1,5	1,5	0,015	5	6	7	0,0186					0,9822	5	
2	1,5	1,5	0,1	256	390		0,1243	0,2051	0,0079	0	0,8821	0,8880	+	
3	1,5	1,5	0,15				0,1856					0,8380	5	
4	1,5	1,5	1,0	256	390		1,2432	0,3861	0,0135	0	0,3996	0,3973	+	
5	1,5	1,5	1,5	-	-	-	1,8647	-	-	-	-	0,2816	5	
6	2,0	1,0	0,02	-	-	-	0,0155	-	-	-	-	0,9844	4	
7	2,0	1,0	0,1	-	-	-	0,0755	-	-	-	-	0,9308	4	
8	2,0	1,0	0,5	4			0,3866	0,6394	0,0595	0,0082	0,7071		+	
9	2,0	1,5	0,02	-	-	-	0,0282	-	-	-	-	0,9725	4	
10	2,0	1,5	0,1	-	-	-	0,1410	-	-	-	-	0,8785	4	
11	2,0	1,5	0,5	-	-	-	0,7050	-	-	-	-	0,5748	4	
12	2,0	2,0	0,02	-	-	-	0,0409	-	-	-	-	0,9535	4	
13	2,0	2,0	0,02	-	-	-	0,0409	-	-	-	-	0,9623	5	
14	2,0	2,0	0,03	1024	1025		0,0614	0,8773	0,347	0,0330	0,9450	0,9426	+	
15	2,0	2,0	0,1	-	-	-	0,2046	-	-	-	-	0,8347	4	

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
16	2,0	2,0	0,1	-	-	0,2046	-	-	-	0,8230		2
17	2,0	2,0	0,3	I28	I36	0,6139	0,5654	0,0329	0,0012	0,5995	0,6050	+
18	2,0	2,0	0,3	I024	I025	0,6139	0,5655	0,0329	0,0214	0,6198	0,6052	+
19	2,0	2,0	0,4	-	-	0,8196	-	-	-	0,5350		2
20	2,0	2,0	0,4	-	-	0,8196	-	-	-	-	0,5279	5
21	2,0	2,0	0,5	4	8	I,0232	0,4108	0,0599	0,0041	0,4747		+
22	2,0	2,0	0,5	I6	20	I,0232	0,4499	0,0135	0,0010	0,4644	0,4631	+
23	2,0	2,0	0,5	-	-	I,0232	-	-	-	-	0,4696	4
24	2,0	2,0	1,2	-	-	2,4557	-	-	-	0,2100		2
25	2,0	2,0	3,0	64	68	6,1394	0,0480	0,0231	0	0,0711	0,0505	+
26	2,0	2,0	3,0	I024	I025	6,1394	0,0482	0,0231	0,0013	0,0723	0,0503	+
27	2,0	2,0	4,0	-	-	8,1858	-	-	-	0,0170		2
28	2,0	2,0	8,0	64	68	163718	0,0020	0,0041	0	0,0061	0,0020	+
29	2,0	5,0	0,02	-	-	0,1173	-	-	-	-	0,9156	4
30	2,0	5,0	0,1	-	-	0,5865	-	-	-	-	0,7882	4
31	2,0	5,0	0,5	-	-	2,9325	-	-	-	-	0,3271	4
32	3,0	2,0	0,2	256	I75	0,4426	0,6629	0,0180	0,0043	0,6852	0,6880	+
33	3,0	2,0	2,0	256	I75	4,4263	0,1072	0,0142	0	0,1214	0,1110	+
34	5,0	1,0	0,1	-	-	0,1073	-	-	-	-	0,9085	4
35	5,0	1,0	0,5	-	-	0,5360	-	-	-	-	0,6797	4
36	5,0	1,0	1,0	-	-	1,0730	-	-	-	-	0,5318	4

	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
37	5,0	1,5	0,1	-	-	-	0,1710	-	-	-	-	0,8579	4
38	5,0	1,5	0,5	-	-	-	0,8550	-	-	-	-	0,5367	4
39	5,0	1,5	1,0	-	-	-	1,7100	-	-	-	-	0,3549	4
40	5,0	2,0	0,1	-	-	-	0,2346	-	-	-	-	0,8148	4
41	5,0	2,0	0,5	-	-	-	1,1730	-	-	-	-	0,4423	4
42	5,0	2,0	1,0	-	-	-	2,3460	-	-	-	-	0,2592	4
43	5,0	5,0	0,005	-	-	-	0,0308	-	-	-	-	0,9732	5
44	5,0	5,0	0,05	-	-	-	0,3082	-	-	-	-	0,7748	5
45	5,0	5,0	0,1	-	-	-	0,6165	-	-	-	-	0,6187	4
46	5,0	5,0	0,5	-	-	-	3,0821	-	-	-	-	0,1863	5
47	5,0	5,0	1,0	-	-	-	6,1642	-	-	-	-	0,0848	4
48	10,0	1,0	0,01	1024	1025	1025	0,0117	0,9681	0,0104	0	0,9784	0,9865	+
49	10,0	1,0	0,02	16	5	5	0,0235	0,7217	0,1318	0,1150	0,9685	-	+
50	10,0	1,0	0,1	64	15	15	0,1173	0,8334	0,0375	0,0099	0,8808	-	+
51	10,0	1,0	0,1	64	30	30	0,1173	0,8301	0,0375	0,0016	0,8692	-	+
52	10,0	1,0	0,1	64	50	50	0,1173	0,8338	0,0373	0,0001	0,8713	-	+
53	10,0	1,0	0,1	1024	1025	1025	0,1173	0,8275	0,0399	0	0,8675	0,9014	+
54	10,0	1,0	0,1	-	-	-	0,1173	-	-	-	-	0,9002	4
55	10,0	1,0	0,2	16	5	5	0,2347	0,6431	0,1122	0,0363	0,7915	-	+
56	10,0	1,0	0,5	4	1	1	0,5866	0,4164	0,2047	0,1152	0,7363	-	+
57	10,0	1,0	0,5	8	3	3	0,5866	0,4843	0,1150	0,0240	0,6532	-	+

	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
58	10,0	10,0	1,0	0,5	16	4	0,5866	0,5526	0,0882	0,0375	0,6546	-	+
59	10,0	10,0	1,0	0,5	16	10	0,5866	0,5526	0,0876	0,0003	0,6405	-	+
60	10,0	10,0	1,0	0,5	16	50	0,5866	0,5527	0,0882	0	0,6409	-	+
61	10,0	10,0	1,0	0,5	32	5	0,5866	0,5987	0,0488	0,0121	0,6596	-	+
62	10,0	10,0	1,0	0,5	64	15	0,5866	0,6281	0,0247	0,0001	0,6528	0,6580	+
63	10,0	10,0	1,0	0,5	64	30	0,5866	0,6244	0,0267	0	0,6511	0,6580	+
64	10,0	10,0	1,0	0,5	64	50	0,5866	0,6280	0,0247	0	0,6527	0,6580	+
65	10,0	10,0	1,0	0,5	-	-	0,5866	-	-	-	-	0,6640	4
66	10,0	10,0	1,0	1,0	16	5	1,1723	0,4530	0,0670	0,0070	0,5216	-	+
67	10,0	10,0	1,0	1,0	1024	1025	1,1723	0,4720	0,0371	0	0,5091	0,5140	+
68	10,0	10,0	1,0	1,0	-	-	1,1723	-	-	-	-	0,5186	4
69	10,0	10,0	1,0	2,0	16	2,5	2,3465	0,3816	0,0379	0,0029	0,4224	-	+
70	10,0	10,0	1,0	2,0	16	4	2,3465	0,3817	0,0378	0,0001	0,4196	-	+
71	10,0	10,0	1,0	2,0	16	10	2,3465	0,3816	0,0378	0	0,4195	-	+
72	10,0	10,0	1,0	2,0	64	15	2,3465	0,3898	0,0130	0	0,4028	0,3999	+
73	10,0	10,0	1,0	2,0	256	27	2,3465	0,3955	0,0048	0,0001	0,4004	0,3999	+
74	10,0	10,0	1,0	2,0	-	-	2,3465	-	-	-	-	0,4053	4
75	10,0	10,0	1,0	10,0	64	50	11,7324	0,2723	0,0031	0	0,2754	0,2751	+
76	10,0	10,0	1,0	10,0	1024	1025	11,7324	0,2853	0,0111	0	0,3109	0,3112	+
77	10,0	10,0	1,0	20,0	16	5	23,4648	0,2761	0,0264	0	0,2873	0,2882	+

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
78	10,0	1,1	0,5	64	10	0,6503	0,5916	0,0264	0,0030	0,6210	-	+
79	10,0	1,1	2,0	16	4	6,1662	0,3312	0,0377	0,0001	0,3679	-	+
80	10,0	1,2	0,5	64	10	0,7139	0,5643	0,0261	0,0046	0,5949	0,5962	+
81	10,0	1,5	0,1	-	-	0,1810	-	-	-	-	0,8502	4
82	10,0	1,5	0,5	64	15	0,9049	0,4956	0,0248	0,0006	0,5210	0,5235	+
83	10,0	1,5	0,5	-	-	0,9049	-	-	-	-	0,5269	4
84	10,0	1,5	1,0	-	-	1,8100	-	-	-	-	0,3548	4
85	10,0	1,5	2,0	-	-	3,6200	-	-	-	-	0,2322	4
86	10,0	2,0	0,02	16	10	0,0489	0,6697	0,1488	0,1159	0,9344	-	+
87	10,0	2,0	0,1	64	15	0,2447	0,7446	0,0365	0,0252	0,8062	0,8056	+
88	10,0	2,0	0,1	64	30	0,2447	0,7467	0,0366	0,0033	0,7866	0,8060	+
89	10,0	2,0	0,1	64	50	0,2447	0,7448	0,0367	0,0003	0,7816	0,8036	+
90	10,0	2,0	0,1	-	-	0,2447	-	-	-	-	0,8104	4
91	10,0	2,0	0,2	16	10	0,4893	0,5023	0,1184	0,0159	0,6365	-	+
92	10,0	2,0	0,5	16	4	1,2322	0,3446	0,0792	0,0418	0,4657	-	+
93	10,0	2,0	0,5	16	20	1,2322	0,3581	0,0811	0	0,4393	-	+
94	10,0	2,0	0,5	64	15	1,2322	0,4119	0,0226	0,0044	0,4389	0,4339	+
95	10,0	2,0	0,5	64	30	1,2322	0,4083	0,0230	0	0,4313	0,4302	+
96	10,0	2,0	0,5	64	50	1,2322	0,4136	0,0213	0	0,4349	0,4340	+
97	10,0	2,0	0,5	-	-	1,2322	-	-	-	-	0,4392	4

	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	12	13
98	10,0	2,0	2,0	1,0	16	10	2,4465	0,2311	0,0553	0	0,2863	-	+
99	10,0	2,0	2,0	1,0	-	-	2,4465	-	-	-	-	0,2663	4
100	10,0	2,0	2,0	2,0	16	4	4,8930	0,1449	0,0345	0,0065	0,1859	-	+
101	10,0	2,0	2,0	2,0	16	10	4,8930	0,1457	0,0294	0	0,1751	-	+
102	10,0	2,0	2,0	2,0	64	15	4,8930	0,1461	0,0105	0,0001	0,1567	-	+
103	10,0	2,0	2,0	2,0	64	30	4,8930	0,1482	0,0105	0	0,1587	-	+
104	10,0	2,0	2,0	2,0	256	54	4,8930	0,1485	0,0087	0	0,1573	0,1516	+
105	10,0	2,0	2,0	2,0	-	-	4,8930	-	-	-	-	0,1533	4
106	10,0	2,0	2,0	10,0	64	15	24,4648	0,0403	0,0066	0	0,0469	0,0412	+
107	10,0	2,0	2,0	20,0	16	10	48,9296	0,0108	0,0104	0	0,0213	0,0113	+
108	10,0	5,0	5,0	0,1	-	-	0,6265	-	-	-	-	0,6124	4
109	10,0	5,0	5,0	1,0	-	-	6,2650	-	-	-	-	0,0916	4
110	10,0	5,0	5,0	2,0	-	-	12,5300	-	-	-	-	0,0360	4
111	20,0	1,0	1,0	0,02	-	-	0,2470	-	-	-	-	0,9738	5
112	20,0	1,0	1,0	0,5	16	4	0,6116	0,4824	0,1481	0,0112	0,6417	-	+
113	20,0	1,0	1,0	0,5	64	5	0,6116	0,5752	0,0489	0,0123	0,6364	-	+
114	20,0	1,0	1,0	0,5	-	-	0,6116	-	-	-	-	0,6566	4
115	20,0	1,0	1,0	0,5	-	-	0,6116	-	-	-	-	0,5131	4
116	20,0	1,0	1,0	2,0	-	-	2,4466	-	-	-	-	0,4059	4
117	20,0	1,0	1,0	20,0	-	-	24,4656	-	-	-	-	0,2281	5
118	20,0	1,5	1,5	0,5	-	-	0,9300	-	-	-	-	0,6845	4

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	I2	I3
I19	20,0	1,5	1,0			1,8600					0,3620	4
I20	20,0	2,0	0,5	16	4	1,2482	0,2953	0,1517	0,0241	0,4711	-	+
I21	20,0	2,0	0,5	64	10	1,2482	0,3911	0,0440	0,0034	0,4385	-	+
I22	20,0	2,0	0,5	-	-	1,2482	-	-	-	-	0,4375	4
I23	20,0	2,0	1,0	-	-	2,4961	-	-	-	-	0,2716	4
I24	20,0	2,0	2,0	-	-	4,9922	-	-	-	-	0,1699	4
I25	20	5,0	0,5	-	-	3,1520	-	-	-	-	0,2082	4
I26	20,0	5,0	1,0	-	-	6,3150	-	-	-	-	0,1028	4
I27	50,0	1,0	0,5	-	-	0,6260	-	-	-	-	0,6433	4
I28	50,0	1,0	1,0	-	-	1,2530	-	-	-	-	0,5052	4
I29	50,0	1,0	2,0	-	-	2,5062	-	-	-	-	0,4017	4
I30	50,0	1,5	0,5	-	-	0,9450	-	-	-	-	0,5167	4
I31	50,0	1,5	1,0	-	-	1,8899	-	-	-	-	0,3589	4
I32	50,0	1,5	2,0	-	-	3,7798	-	-	-	-	0,2327	4
I33	50,0	2,0	0,5	-	-	1,2631	-	-	-	-	0,4277	4
I34	50,0	5,0	0,5	-	-	3,1720	-	-	-	-	0,2064	4
I35	50,0	5,0	1,0	-	-	6,3450	-	-	-	-	0,1103	4

Сводная таблица вариантов для коридорного трубного пучка с чередованием в одном направлении двух разных шагов. Обозначения см. фиг. 3а.

№	$\frac{S_1}{d}$	1	$\frac{S_2}{d}$	2	KS_1	KS_0	D	Источ- ник
I36	2	1,0	2	1,0	1,4099	0,4034	5	
I37	2	1,1	4	0,01	0,0275	0,9733	5	
I38	2	1,1	8	0,01	0,0529	0,9472	5	
I39	2	1,1	8	0,04	0,2117	0,8345	5	
I40	4	1,1	4	0,04	0,1199	0,8917	5	
I41	6	1,0	4	0,03	0,0905	0,9179	5	
I42	6	1,0	4	0,12	0,3620	0,7383	5	
I43	6	1,0	4	0,30	0,9049	0,5275	5	
I44	6	1,0	8	0,03	0,1605	0,8616	5	
I45	6	1,0	8	0,30	1,6052	0,4023	5	
I46	6	1,1	4	0,03	0,0924	0,9138	5	
I47	6	1,1	4	0,06	0,1848	0,8386	5	
I48	6	1,1	8	0,03	0,1737	0,8752	5	
I49	6	1,1	8	0,06	0,3475	0,7798	5	
I50	6	1,1	8	0,12	0,6951	0,6116	5	
I51	6	1,1	8	0,60	3,4751	0,2681	5	
I52	6	1,1	8	1,20	6,9514	0,1751	5	
I53	6	1,2	8	0,03	0,1757	0,8724	5	
I54	6	2,0	4	0,12	0,4384	0,7182	5	
I55	6	2,0	8	0,12	0,7439	0,5896	5	
I56	6	2,0	8	0,60	3,7197	0,2061	5	

Сводная таблица вариантов для шахматного трубного пучка. Обозначения см. фиг. 3б

№	$\frac{S_1}{d}$	$\frac{S_2}{d}$	KS ₁	KS ₂	D	Источник
I57	2,0	1,5	0,02	0,0282	0,972I	4
I58	2,0	1,5	0,10	0,1410	0,8775	4
I59	2,0	1,5	0,50	0,7050	0,5711	4
I60	2,0	1,732	0,10	0,1705	0,8450	2
I61	2,0	1,732	0,40	0,6822	0,5600	2
I62	2,0	1,732	1,20	2,0465	0,2400	2
I63	2,0	1,732	4,0	6,8216	0,0270	2
I64	2,0	2,0	0,02	0,0409	0,9595	4
I65	2,0	2,0	0,10	0,2046	0,8291	4
I66	2,0	2,0	0,50	1,0230	0,4360	4
I67	2,0	5,0	0,02	0,1173	0,8928	4
I68	2,0	5,0	0,10	0,5865	0,6155	4
I69	2,0	5,0	0,50	2,9325	0,1858	4
I70	3,0	2,828	0,075	0,2452	0,8050	2
I71	3,0	2,828	0,30	0,9806	0,5000	2
I72	3,0	2,828	0,90	2,9417	0,2000	2
I73	3,0	2,828	3,0	9,8057	0,0270	2
I74	5,0	1,5	0,10	0,1710	0,8576	4
I75	5,0	1,5	0,50	0,8550	0,5361	4
I76	5,0	2,0	0,10	0,2346	0,8132	4
I77	5,0	2,0	0,50	1,1730	0,4400	4
I78	5,0	5,0	0,10	0,6165	0,6123	4
I79	5,0	5,0	0,50	3,0821	0,1933	4
I80	10,0	1,5	0,10	0,1810	0,8524	4
I81	10,0	1,5	0,50	0,9050	0,5307	4
I82	10,0	2,0	0,10	0,2446	0,8063	4
I83	10,0	2,0	0,50	1,2230	0,4346	4
I84	10,0	5,0	0,10	0,6265	0,6157	4
I85	10,0	5,0	0,50	3,1320	0,2005	4

Значения коэффициента пропускания межтрубной
среды при излучении i -ую трубу D_i :

№	$\frac{S_1}{d}$	$\frac{S_2}{d}$	KS_1	n	$\frac{h}{S_1}$	Значения D_i				
						$i=0$	$\frac{1}{4}n$	$\frac{2}{4}n$	$\frac{3}{4}n$	n
2	1,5	1,5	0,1	256	390	0,9304	0,8883	0,8883	0,8883	0,5489
4	1,5	1,5	1	256	390	0,5880	0,3973	0,3973	0,3973	0,2632
8	2	1	0,5	4	5	0,8016	0,7450	0,7261	0,6956	0,4691
14	2	2	0,03	1024	1025	0,9670	0,9426	0,9426	0,9426	0,9467
17	2	2	0,3	128	136	0,7623	0,6050	0,6050	0,6050	0,3812
18	2	2	0,3	1024	1025	0,7624	0,6052	0,6052	0,6052	0,6242
21	2	2	0,5	4	8	0,6708	0,4964	0,4706	0,4467	0,3122
22	2	2	0,5	16	20	0,6688	0,4634	0,4631	0,4629	0,3118
25	2	2	3	64	68	0,3130	0,0505	0,0505	0,0505	0,0359
26	2	2	3	1024	1025	0,3132	0,0506	0,0506	0,0506	0,0483
28	2	2	8	64	68	0,1998	0,0020	0,0020	0,0020	0,0015
32	3	2	0,2	256	175	0,8195	0,6879	0,6879	0,6879	0,4911
33	3	2	2	256	175	0,4063	0,1110	0,1110	0,1110	0,0651
48	10	1	0,01	1024	1025	0,9936	0,9885	0,9885	0,9884	0,5098
49	10	1	0,02	16	5	0,9855	0,9789	0,9732	0,9627	0,9072
50	10	1	0,1	64	15	0,9422	0,9022	0,8966	0,8817	0,4626
51	10	1	0,1	64	30	0,9405	0,8967	0,9902	0,8692	0,4756
52	10	1	0,1	64	50	0,9418	0,9012	0,8938	0,8711	0,4642
53	10	1	0,1	1024	1025	0,9438	0,9002	0,9002	0,9002	0,4644
55	10	1	0,2	16	5	0,8884	0,8352	0,8024	0,7563	0,5622
56	10	1	0,5	4	1	0,8036	0,7624	0,7363	0,7170	0,6412
57	10	1	0,5	8	3	0,7784	0,7018	0,6550	0,6124	0,4333
58	10	1	0,5	16	4	0,7959	0,6966	0,6563	0,6142	0,4076

№	$\frac{S_1}{d}$	$\frac{S_2}{d}$	KS ₁	n	$\frac{h}{S_1}$	Значения D _i				
						i=0	$\frac{1}{4}n$	$\frac{2}{4}n$	$\frac{3}{4}n$	n
59	IO	I	0,5	16	10	0,7925	0,6903	0,6448	0,5956	0,3457
60	IO	I	0,5	16	50	0,7924	0,6902	0,6447	0,5950	0,3441
61	IO	I	0,5	32	5	0,8007	0,6796	0,6611	0,6423	0,4362
62	IO	I	0,5	64	15	0,8008	0,6641	0,6580	0,6498	0,3394
63	IO	I	0,5	64	30	0,8008	0,6641	0,6580	0,6498	0,3382
64	IO	I	0,5	64	50	0,8008	0,6641	0,6580	0,6498	0,3382
66	IO	I	I	16	5	0,7050	0,5583	0,5174	0,4862	0,2688
67	IO	I	I	1024	1025	0,7069	0,5140	0,5140	0,5140	0,2621
69	IO	I	2	16	2,5	0,6194	0,4334	0,4063	0,3970	0,2328
70	IO	I	2	16	4	0,6194	0,4331	0,4051	0,3934	0,2032
71	IO	I	2	16	10	0,6193	0,4331	0,4051	0,3932	0,2024
72	IO	I	2	64	15	0,6196	0,4005	0,3999	0,3997	0,2018
73	IO	I	2	256	27	0,6196	0,3999	0,3999	0,3999	0,2105
75	IO	I	IO	64	50	0,4165	0,2751	0,2751	0,2751	0,1376
76	IO	I	IO	1024	1025	0,4633	0,3112	0,3112	0,3112	0,1556
77	IO	I	20	16	5	0,4096	0,2882	0,2882	0,2882	0,1441
78	IO	I,I	0,5	64	10	0,7840	0,6297	0,6246	0,6194	0,3645
79	IO	I,I	2	16	4	0,5930	0,3790	0,3514	0,3400	0,1769
80	IO	I,2	0,5	64	10	0,7698	0,6007	0,5962	0,5928	0,3740
82	IO	I,5	0,5	64	15	0,7336	0,5269	0,5235	0,5201	0,2798
86	IO	2	0,02	16	10	0,9729	0,9566	0,9410	0,9159	0,8368
87	IO	2	0,1	64	15	0,8958	0,8086	0,8056	0,8043	0,7056
88	IO	2	0,1	64	30	0,8970	0,8102	0,8060	0,7943	0,4499
89	IO	2	0,1	64	50	0,8957	0,8080	0,8036	0,7902	0,4192
91	IO	2	0,2	16	10	0,8168	0,7033	0,6449	0,5733	0,4020
92	IO	2	0,5	16	4	0,6810	0,4678	0,4357	0,4292	0,4235

№	$\frac{S_1}{d}$	$\frac{S_2}{d}$	KS_1	n	$\frac{h}{S_1}$	Значения D_i				
						$i=0$	$\frac{1}{4}n$	$\frac{2}{4}n$	$\frac{3}{4}n$	n
93	10	2	0,5	16	20	0,6871	0,4872	0,4292	0,3786	0,2281
94	10	2	0,5	64	15	0,6888	0,4359	0,4339	0,4332	0,2980
95	10	2	0,5	64	30	0,7068	0,4322	0,4302	0,4284	0,2241
96	10	2	0,5	64	50	0,6889	0,4360	0,4340	0,4321	0,2260
98	10	2	1	16	10	0,5816	0,3059	0,2653	0,2437	0,1369
100	10	2	2	16	4	0,4992	0,1784	0,1779	0,1776	0,1398
101	10	2	2	16	10	0,4960	0,1703	0,1538	0,1498	0,0782
102	10	2	2	64	15	0,4944	0,1497	0,1497	0,1497	0,0803
103	10	2	2	64	30	0,4942	0,1519	0,1518	0,1518	0,0778
104	10	2	2	256	54	0,4954	0,1516	0,1516	0,1516	0,0780
106	10	2	10	64	15	0,3351	0,0412	0,0412	0,0412	0,0206
107	10	2	20	16	10	0,2564	0,0113	0,0113	0,0113	0,0056
112	20	1	0,5	16	4	0,7779	0,6913	0,6390	0,5929	0,3907
113	20	1	0,5	64	5	0,7958	0,6509	0,6352	0,6158	0,4176
120	20	1	0,5	16	4	0,6852	0,5262	0,4548	0,4039	0,3013
121	20	2	0,5	64	10	0,6989	0,4504	0,4336	0,4149	0,2489

Таблица 5

Значения локального коэффициента пропускания

 D_α при $i = \frac{n}{2}$ в зависимости от α .

№	$\frac{S_1}{d}$	$\frac{S_2}{d}$	KS_1	Значения D_α при $\alpha =$				
				0	$\frac{1}{8}\pi$	$\frac{2}{8}\pi$	$\frac{3}{8}\pi$	$\frac{4}{8}\pi$
I	1,5	1,5	0,015	0,9836		0,9798		0,9836
2	1,5	1,5	0,100	0,9022	0,8870	0,8787	0,8876	0,9022
3	1,5	1,5	0,150	0,8590		0,8295		0,8590
4	1,5	1,5	1,0000	0,4391	0,3959	0,3591	0,3959	0,4391
5	1,5	1,5	1,500	0,3196	0,2820	0,2326	0,2820	0,3196
I3	2	2	0,02	0,9641		0,9628		0,9635
I4	2	2	0,03	0,9472	0,9413	0,9415	0,9411	0,9472
I7	2	2	0,30	0,6206	0,6026	0,5944	0,6026	0,6206
I8	2	2	0,30	0,6206	0,6025	0,5944	0,6026	0,6208
20	2	2	0,40	0,5419		0,5213		0,5419
22	2	2	0,50	0,4786	0,4606	0,4522	0,4606	0,4786
25	2	2	3,00	0,0575	0,0500	0,0441	0,0500	0,0575
26	2	2	3,00	0,0576	0,0500	0,0441	0,0500	0,0575
28	2	2	8,00	0,0028	0,0020	0,0016	0,0020	0,0028
32	3	2	0,20	0,6767	0,6676	0,6798	0,7045	0,7205
43	5	5	0,005	0,9753		0,9724		0,9753
44	5	5	0,05	0,7767		0,7738		0,7767
46	5	5	0,5	0,1932		0,1827		0,1936
48	10	1	0,01	0,9823	0,9813	0,9868	0,9953	1,0000
53	10	1	0,1	0,8462	0,8413	0,8808	0,9563	1,0000
67	10	1	1,00	0,2471	0,2717	0,4105	0,7488	1,0000
73	10	1	2,00	0,0750	0,1099	0,2769	0,6754	1,0000
75	10	1	10,0	0,0000	0,0243	0,1675	0,5880	1,0000
77	10	1	20,0	0,0000	0,0129	0,1183	0,5222	1,0000
I04	10	2	2,0	0,0438	0,0689	0,1475	0,2315	0,2716
I06	10	2	10,0	0,0000	0,0075	0,0360	0,0735	0,0942
I07	10	2	20,0	0,0000	0,0015	0,0089	0,0208	0,0277
III	20	1	0,02	0,9635		0,9723		1,0000

Значения локального коэффициента пропускания

 D_{α} при $i = \frac{n}{2}$ для вариантов № 17 и 72

α	D_{α}	
	Вар. № 17	Вар. № 72
0	0,6206	0,0750
π/32	0,6189	0,0767
2π/32	0,6148	0,0818
3π/32	0,6086	0,0931
4π/32	0,6026	0,1099
5π/32	0,5982	0,1348
6π/32	0,5957	0,1698
7π/32	0,5940	0,2165
8π/32	0,5944	0,2769
9π/32	0,5940	0,3536
10π/32	0,5957	0,4470
11π/32	0,5982	0,5560
12π/32	0,6026	0,6754
13π/32	0,6086	0,7952
14π/32	0,6148	0,9007
15π/32	0,6189	0,9734
16π/32	0,6206	1,0000

Значения локального коэффициента пропуска для тубного ряда
в соседстве с излучающим объемом

№	$\frac{S_1}{d}$	$\frac{S_2}{d}$	KS_1	n	$\frac{X}{S_1}$	Значения D_α при $\alpha =$					
						$-\frac{2}{4}\pi$	$-\frac{1}{4}\pi$	0	$\frac{1}{4}\pi$	$\frac{2}{4}\pi$	
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	
2	1,5	1,5	0,1	256	0,3333	I	0,9706	0,9253	0,8788	0,9022	
2	1,5	1,5	0,1	256	133,3333	0	0,1830	0,6893	0,8781	0,9022	
4	1,5	1,5	I	256	0,3333	I	0,7582	0,5179	0,3593	0,4390	
4	1,5	1,5	I	256	133,3333	0	0,1034	0,3760	0,3590	0,4390	
14	2	2	0,03	1024	0,25	I	0,9904	0,9650	0,9425	0,9472	
14	2	2	0,03	1024	0,5	0,9572	0,9488	0,9500	0,9416	0,9472	
17	2	2	0,3	128	0,25	I	0,9183	0,7303	0,5999	0,6206	
17	2	2	0,3	128	7,5	0,0400	0,1623	0,4528	0,5862	0,6206	
18	2	2	0,3	1024	0,5	0,6704	0,6335	0,6298	0,5946	0,6208	
22	2	2	0,5	16	0,25	I	0,8676	0,6149	0,4584	0,4786	
22	2	2	0,5	16	3,5	0,0699	0,1615	0,3704	0,4473	0,4786	
25	2	2	3	64	0,25	I	0,5403	0,1379	0,0454	0,0576	
25	2	2	3	64	3,5	0	0,0177	0,0539	0,0441	0,0576	
26	2	2	3	1024	0,5	0,0440	0,0417	0,0572	0,0441	0,0575	
28	2	2	8	64	0,25	I	0,2889	0,0155	0,0013	0,0028	
28	2	2	8	64	3,5	0	0,0006	0,0028	0,0012	0,0028	
32	3	2	0,2	256	0,1667	I	0,9368	0,7892	0,6942	0,7205	

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
32	3	2	0,2	256	4	0,2736	0,3220	0,4921	0,6556	0,7205
33	3	2	2	256	0,1667	I	0,6835	0,2444	0,1156	0,1616
33	3	2	2	256	4	0	0,0207	0,0562	0,1038	0,1616
48	10	1	0,01	1024	0,05	I	0,9977	0,9898	0,9877	I
48	10	1	0,01	1024	922,5	0	0,1500	0,5214	0,8718	I
53	10	1	0,1	1024	0,05	I	0,9784	0,9110	0,8894	I
53	10	1	0,1	1024	922,5	0	0,1338	0,4450	0,7776	I
62	10	1	0,5	64	0,05	I	0,9116	0,6829	0,6140	I
62	10	1	0,5	64	8,5	0,0040	0,0854	0,2511	0,5204	I
67	10	1	I	1024	0,05	I	0,8584	0,5285	0,4519	I
67	10	1	I	1024	922,5	0	0,0471	0,1328	0,3750	I
72	10	1	2	64	0,05	I	0,7951	0,3786	0,3191	I
72	10	1	2	64	8,5	0	0,0156	0,0408	0,2653	I
73	10	1	2	256	1,3	0,0254	0,0331	0,0454	0,2654	I
75	10	1	10	64	0,05	I	0,6012	0,1373	0,1743	I
75	10	1	10	64	43,5	0	0	0	0,1675	I
77	10	1	20	16	0,05	I	0,4954	0,0575	0,1182	I
77	10	1	20	16	3,3	0	0	0	0,1182	I
80	10	1,2	0,5	64	0,05	I	0,9070	0,6720	0,5789	0,8413
80	10	1,2	0,5	64	2,22	0,1817	0,2087	0,2860	0,4884	0,8413

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
82	10	1,5	0,5	64	0,05	I	0,8987	0,6561	0,5377	0,6861
82	10	1,5	0,5	64	5,3	0,0262	0,0881	0,2304	0,4441	0,6861
96	10	2	0,5	64	0,05	I	0,8902	0,6264	0,4768	0,5271
96	10	2	0,5	64	37,1	0	0,0613	0,1956	0,3832	0,5271
102	10	2	2	64	0,05	I	0,7890	0,3630	0,1958	0,2716
102	10	2	2	64	2,1	0,0039	0,0212	0,0267	0,1420	0,2716
104	10	2	2	256	2,7	0,0010	0,0102	0,0252	0,1420	0,2716
106	10	2	10	64	0,05	1,0006	0,6058	0,1378	0,0428	0,0942
106	10	2	10	64	2,1	0	0	0	0,0360	0,0942
107	10	2	20	16	0,05	I	0,4610	0,0572	0,0098	0,0277
107	10	2	20	16	6,7	0	0	0	0,0088	0,0277

Значения локального обобщенного углового коэффициента $\psi_{\alpha,12}$ и среднего обобщенного углового коэффициента $\psi_{1,2}$ от грубого ряда I на плоскость 2

№	$\frac{S_1}{Q}$	$\frac{S_2}{Q}$	KS ₁	x	$\frac{S_1}{S_2}$	Значения $\psi_{\alpha,12}$ при $\alpha =$										Значения	
						$-\frac{4}{8}\pi$	$-\frac{3}{8}\pi$	$-\frac{2}{8}\pi$	$-\frac{1}{8}\pi$	0	$\frac{1}{8}\pi$	$\frac{2}{8}\pi$	$\frac{3}{8}\pi$	$\frac{4}{8}\pi$	$\psi_{1,2}$	ИИЯ	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
2	1,5	1,5	0,1	0,3333	1,0	0,9504	0,7855	0,5195	0,2360	0,3569	0,0007	0,0	0,0	0,0	0,3815		
4	1,5	1,5	1,0	0,3333	1,0	0,9088	0,6548	0,3676	0,1420	0,0286	0,0003	0,0	0,0	0,0	0,3248		
8	2,0	1,0	0,5	2,5000	0,1234	0,1209	0,0910	0,0557	0,0261	0,0078	0,0008	0,0	0,0	0,0	0,0461		
14	2,0	2,0	0,03	0,2500	1,0	0,9567	0,8159	0,5874	0,3285	0,1235	0,0178	0,0	0,0	0,0	0,4161		
17	2,0	2,0	0,3	0,5000	0,9572	0,9088	0,7743	0,5590	0,3136	0,1179	0,0170	0,0	0,0	0,0	0,3960		
18	2,0	2,0	0,3	7,5000	0,0400	0,0367	0,0278	0,0166	0,0073	0,0002	0,0002	0,0	0,0	0,0	0,0838		
21	2,0	2,0	0,5	3,5000	0,6704	0,6193	0,4990	0,3426	0,1483	0,0653	0,0086	0,0	0,0	0,0	0,2567		
22	2,0	2,0	0,5	0,2500	1,0	0,9367	0,7539	0,5012	0,2571	0,0035	0,0003	0,0	0,0	0,0	0,0240		
25	2,0	2,0	3,0	3,5000	0,0699	0,0693	0,0478	0,0285	0,0127	0,0884	0,0115	0,0	0,0	0,0	0,3810		
28	2,0	2,0	8,0	0,5000	0,0440	0,0378	0,0239	0,0109	0,0033	0,0035	0,0003	0,0	0,0	0,0	0,0240		
				3,500	1,0	0,7077	0,2883	0,0745	0,0127	0,0012	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0124		
															0,1983		

	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
32	3,0	2,0	0,2	0,1667	1,0	0,9532	0,8127	0,6011	0,3682	0,1694	0,0440	0,0006	0,0	0,4312	
	4,0000	0,2736	0,2522	0,1979	0,1315	0,0712	0,0278	0,0054	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1029		
33	3,0	2,0	2,0	0,1667	1,0	0,9046	0,6628	0,3964	0,1882	0,0647	0,0118	0,0001	0,0	0,3412	
48	10,0	1,0	0,01	0,0500	1,0	0,9607	0,8477	0,6756	0,4684	0,2750	0,1159	0,0223	0,0	0,4838	
49	10,0	1,0	0,02	0,0500	1,0	0,9606	0,8473	0,6742	0,4675	0,2749	0,1154	0,0221	0,0	0,4827	
	3,3000	0,8810	0,8302	0,7107	0,5495	0,3719	0,2087	0,0826	0,0136	0,0	0,4008				
50	10,0	1,0	0,10	0,0500	1,0	0,9603	0,8441	0,6616	0,4634	0,2765	0,1113	0,0205	0,0	0,4796	
	8,5000	0,2655	0,2454	0,1940	0,1305	0,0721	0,0292	0,0066	0,0003	0,0	0,1014				
51	10,0	1,0	0,1	23,5000	0,0386	0,0356	0,0275	0,0169	0,0077	0,0022	0,0002	0,0000	0,0	0,0133	
52	10,0	1,0	0,1	43,5000	0,0037	0,0034	0,0026	0,0015	0,0006	0,0001	0,0	0,0	0,0	0,0012	
55	10,0	1,0	0,2	0,0500	1,0	0,9593	0,8410	0,6611	0,4552	0,2601	0,1071	0,0190	0,0	0,4753	
56	10,0	1,0	0,5	0,0500	0,6190	0,5743	0,4689	0,3371	0,2066	0,1003	0,0316	0,0031	0,0	0,2539	
57	10,0	1,0	0,5	2,1000	0,1968	0,1814	0,1417	0,0927	0,0486	0,0191	0,0035	0,0001	0,0	0,0731	
58	10,0	1,0	0,5	2,3000	0,1722	0,1587	0,1236	0,0803	0,0415	0,0001	0,0028	0,0001	0,0	0,0635	
59	10,0	1,0	0,5	8,3000	0,0045	0,0041	0,0032	0,0018	0,0007	0,0001	0,0	0,0	0,0	0,0015	
61	10,0	1,0	0,5	1,7000	0,2581	0,2381	0,1871	0,1245	0,0673	0,0267	0,0058	0,0002	0,0	0,0974	
62	10,0	1,0	0,5	0,0500	1,0	0,9561	0,8290	0,6408	0,4326	0,2383	0,0937	0,0154	0,0	0,4628	
	8,5000	0,0040	0,0037	0,0028	0,0017	0,0006	0,0001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0014	
66	10,0	1,0	1,0	0,0500	1,0	0,9513	0,8112	0,6103	0,3948	0,2081	0,0767	0,0112	0,0	0,4455	
	3,3000	0,0117	0,0108	0,0082	0,0048	0,0020	0,0005	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0040	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
69	10,0	1,0	1,0	2,0	0,0500	1,0	0,9429	0,7795	0,5583	0,3375	0,1640	0,0538	0,0062	0,0	0,4177
					0,8000	0,0873	0,0798	0,0603	0,0367	0,0169	0,0051	0,0007	0,0	0,0	0,0304
70	10,0	1,0	1,0	2,0	2,3000	0,0025	0,0022	0,0017	0,0009	0,0003	0,0001	0,0	0,0	0,0	0,0008
73	10,0	1,0	1,0	2,0	1,3000	0,0254	0,0233	0,0175	0,0102	0,0043	0,0011	0,0001	0,0	0,0	0,0086
75	10,0	1,0	1,0	10,0	43,5000	1,0	0,8805	0,6012	0,3253	0,1373	0,0415	0,0068	0,0002	0,0	0,2789
77	10,0	1,0	1,0	20,0	0,0500	1,0	0,8282	0,4954	0,2390	0,0575	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2655
78	10,0	1,1	1,1	0,5	2,8600	0,1194	0,1100	0,0852	0,0543	0,0271	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0434
80	10,0	1,2	1,2	0,5	2,2200	0,1817	0,1675	0,1306	0,0850	0,0442	0,0163	0,0031	0,0001	0,0	0,0672
82	10,0	1,5	1,5	0,5	5,3000	0,0268	0,0241	0,0185	0,0112	0,0049	0,0013	0,0001	0,0	0,0	0,0091
86	10,0	2,0	2,0	0,02	6,7000	0,7787	0,7291	0,6138	0,4639	0,3061	0,1650	0,0617	0,0087	0,0	0,3421
87	10,0	2,0	2,0	0,1	2,1000	0,6811	0,6347	0,5261	0,3883	0,2478	0,1274	0,0440	0,0052	0,0	0,2892
88	10,0	2,0	2,0	0,1	17,1000	0,0855	0,0790	0,0613	0,3388	0,2478	0,1274	0,0440	0,0052	0,0	0,2892
89	10,0	2,0	2,0	0,1	37,1000	0,0076	0,0071	0,0054	0,0032	0,0190	0,0062	0,0009	0,0	0,0	0,0321
91	10,0	2,0	2,0	0,2	6,7000	0,1369	0,1264	0,0984	0,0636	0,0324	0,0003	0,0	0,0	0,0	0,0026
92	10,0	2,0	2,0	0,5	0,7000	0,5301	0,4724	0,3966	0,2641	0,1674	0,0703	0,0229	0,0018	0,0	0,2041
94	10,0	2,0	2,0	0,5	2,1000	0,1967	0,1814	0,1417	0,0927	0,0486	0,0182	0,0035	0,0001	0,0	0,0731
98	10,0	2,0	2,0	1,0	6,7000	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0001
100	10,0	2,0	2,0	2,0	0,7000	0,1127	0,1030	0,0781	0,0479	0,0227	0,0071	0,0010	0,0	0,0	0,0395
102	10,0	2,0	2,0	2,0	0,0039	0,0039	0,0100	0,0116	0,0070	0,0016	0,0001	0,0	0,0	0,0	0,0039

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I04	10,0	2,0	2,0	2,7000	0,0010	0,0009	0,0007	0,0004	0,0001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0000
I07	10,0	2,0	20,0	0,0500	1,0	0,8142	0,4610	0,1642	0,0572	0,0112	0,0009	0,0	0,0	0,0,2508
I12	20,0	1,0	0,5	0,0250	1,0	0,9589	0,8397	0,6629	0,4597	0,2667	0,1134	0,0232	0,0	0,4782
				3,1500	0,1007	0,0929	0,0721	0,0459	0,0227	0,0076	0,0012	0,0	0,0	0,0366
I13	20,0	1,0	0,5	1,7500	0,2540	0,2346	0,1849	0,1236	0,0674	0,0269	0,0059	0,0002	0,0	0,0963
I20	20,0	2,0	0,5	2,3500	0,1695	0,1555	0,1222	0,0798	0,0415	0,0153	0,0028	0,0001	0,0	0,0629
I21	20,0	2,0	0,5	9,5500	0,0781	0,0721	0,0558	0,0351	0,0169	0,0054	0,0007	0,0	0,0	0,0281

Т а б л и ц а 9

Значения локальных и средних обобщенных угловых коэффициентов $\Psi_{\alpha, \tau-\tau}$ и $\Psi_{\tau-\tau}$, характеризующие теплообмен между двумя трубами.

№ примен. вариантов	$\frac{s}{d}$	kd	Значения $\Psi_{\alpha, \tau-\tau}$ при $\alpha =$				$\Psi_{\tau-\tau}$
			0	$\frac{1}{8}\pi$	$\frac{2}{8}\pi$	$\frac{4}{8}\pi$	
57, 58, 61, 62	10	0,05	0,0337	0,0273	0,0194	0,0094	0
75	I	I	I	-	0,1675	-	0
77	I	2	I	-	0,1182	-	0
106	2	I	0,0942	-	0,0360	-	0
107	2	2	0,0277	-	0,0088	-	0

Л и т е р а т у р а

1. И.Р. Мияк. Определение некоторых характеристик излучающих систем с серой средой. Труды ТПИ, серия А, №206, 1963.
2. В.Ескерт: VDS— *Forschungsheft* 387, Ausgabe 13, Bd. 8, 1937.
3. М.А. Стырикович и Р.С. Берштейн "Советское козлотурбостроение", №1-2 1941.
4. И.Р. Мияк. "Теплоэнергетика", 1963, №9.
5. И.Р. Мияк. Некоторые рекомендации к расчету теплообмена излучением в межтрубном пространстве. Труды ТПИ, серия А, № 206, 1963.
6. И.Р. Мияк, И.П. Эпик. "Инженерно-физический журнал", 1961, 4, № 6.

УДК 662.87:662.67:621.926.4.004.12

Л.М. Ниспуу

О ПРОЦЕССЕ РАЗМОЛА СЛАНЦЕВ В МОЛОТКОВЫХ МЕЛЬНИЦАХ

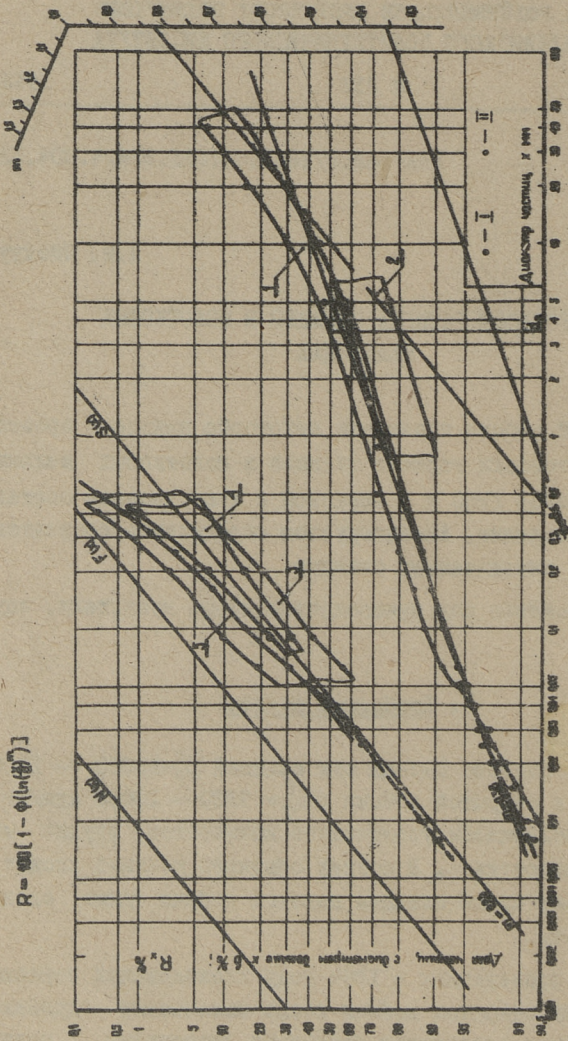
В настоящей работе приведены некоторые данные о процессе размола эстонских горючих сланцев в молотковых мельницах Прибалтийской ГРЭС и о зерновом и вещественном составе продукта измельчения. Анализируется определение показателя равномерности измельченных сланцев.

Работа выполнена под руководством проф. докт. техн. наук И.П. Эника.

1. Дробление сланцы

На станции сжигают сланцы как шахтной ($Q_p^r \approx 10000 - 12000$ кдж/кг), так и открытой добычи ($Q_p^r \approx 5900 - 10000$ кдж/кг). В последних содержится увеличенное количество трудно измельчаемого известняка. В состав обычного топлива входят в последнее время кроме сланцев шахтной добычи также сланцы открытой добычи.

На основе проведенных в 1964 году исследований зерновой состав сланцев открытой добычи после молотковых дробилок характеризовался следующими основными значениями полных остатков на ситах:



Фиг. 1. Данные ситового (I) и осадиметрического (II) анализа дробленых и размоловых сланцев Прибалтийской ГРС на диаграмме КФЖ. 1 и 3 - сланцы открытой добычи; 2 и 4 - сланцы шахтной добычи [8]; 5 - зерновой состав отдельной пробы пыли сланцев открытой добычи

$$R_{40}^{\text{ж}} = 7 - 16\%$$

$$R_{10} = 30 - 45\%$$

$$R_5 = 47 - 56\%$$

$$R_I = 65 - 75\%$$

$$R_{0,25} = 80 - 87\%$$

$$R_{0,063} = 91,5 - 94\%$$

Эти интервалы зернового состава со всеми промежуточными значениями приведены в виде полосы под номером I (фиг. I) на диаграмме Колмогорова-Фая-Хелева (КФХ) [I и 2]. По данным М.Б. Дубовского и М.В. Патроновой [3], зерновой состав сланцев шахтной добычи на станции имеет значения R , которые изображены на фиг. I под номером 2. Показатель равномерности^ж для вышеупомянутых полос зернового состава сланцев как шахтной, так и открытой добычи по диаграмме КФХ на фиг. I имеет среднее значение $m = 0,36$, или по диаграмме Розина-Рамлера-Беннета (РРБ) [4] $n = 0,57$. По фиг. I массовый медианный диаметр частиц топлива $d_s \approx 3,5 - 18$ мм.

Крупность дробления оказывает существенное влияние на процесс размола и надежную работу установки. Поэтому для твердых топлив по "Нормам расчета и проектирования пылеприготовительных установок" [5] рекомендуется следующие характеристики дробления для всех мельниц: $R_5 = 20\%$ и максимальный размер куска не больше 15 мм. Для сланцев на станции $R_5 = 47 - 76\%$ (фиг. I), что, конечно, неблагоприятно отражается на надежности работы мельниц. По диаграмме КФХ [I] сланец открытой добычи при среднем значении $R_5 = 51,5\%$ и $m = 0,36$ имеет удельную идеализированную поверхность (для шарообразных частиц и плотности 1 г/см^3) равную $49 \text{ м}^2/\text{кг}$, а при рекомендованном значении $R_5 = 20\%$ и при $m = 0,47$ удельная идеализированная поверхность топлива равнялась бы $67 \text{ м}^2/\text{кг}$. Пыль сланцев по графику массового рас-

^ж Для топлива в обозначении R_{40} , R_{10} и т.д. индекс означает размер ячейки сита в мм, для пыли - в мкм.

^{жж} Показатель равномерности определен графически направлением полосы без учета изгиба ее верхнего конца, обусловленного сепарацией при дроблении и при сортировке.

предела $S(x)$ на фиг. 1, т.е. при $R_{90} = 27\%$ и $m = 0,83$, имеет удельную идеализированную поверхность $281 \text{ м}^2/\text{кг}$. Следовательно, более тонкое дробление кроме повышения надежности работы мельниц выполняет еще некоторую долю работы по производству вновь обнаженной поверхности.

Содержание золы и карбонатной углекислоты, соотношение песчано-глинистой и карбонатной частей (Т/К) и средние плотности частиц по 16 ситовым фракциям 3-х проб дробленых сланцев неодинаковые и имеют следующие минимальные и максимальные значения (фиг. 2):

$$\begin{aligned} A^C &= 40,8 - 56,6\%; & (CO_2)_K^C &= 11,3 - 28,4\%; \\ T/K &= 0,22 - 1,22 & \rho &= 1,58 - 2,07 \text{ г/см}^3. \end{aligned}$$

Минимальное содержание золы и карбонатной углекислоты наблюдается при размере частиц топлива от 50 до 63 мкм. Содержание карбонатной углекислоты, следовательно, и карбонатной части К, так как $K = 2,257 \cdot (CO_2)_K^C$ по [7], имеет тенденцию заметно увеличиваться при больших частицах. Соотношение песчано-глинистой и карбонатной частей

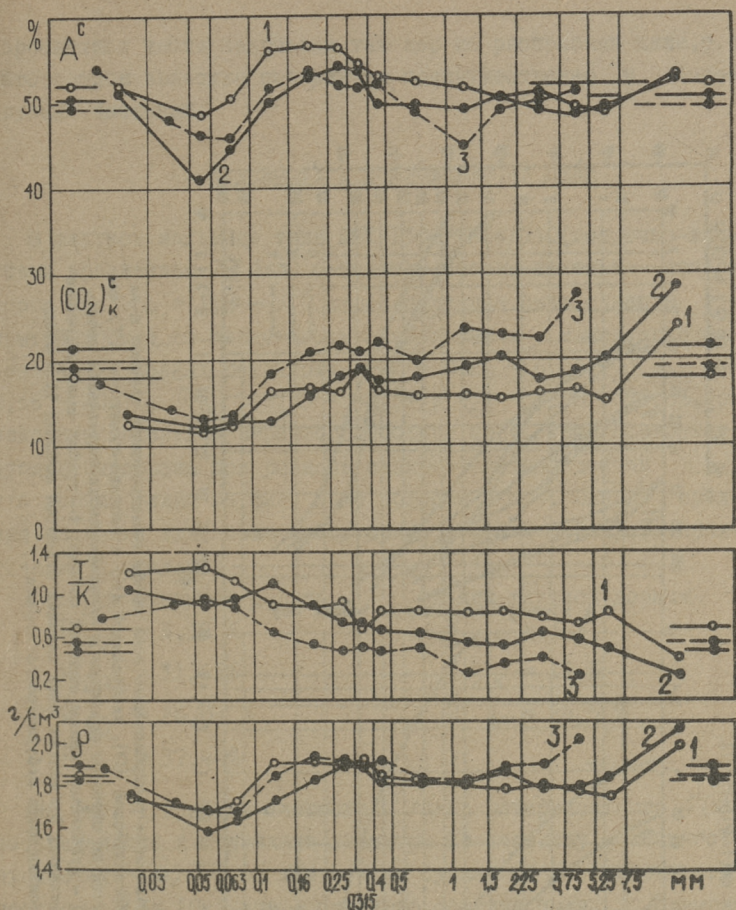
$$\frac{T}{K} = 0,413 \frac{A}{(CO_2)_K^C} - 0,519,$$

выведенное на основе формул [7], имеет наибольшие значения по ситовым фракциям топлива в области малых частиц. Средние плотности частиц в ситовых фракциях и во всей пробе измельченных горючих сланцев определены по формуле И.Р. Микка

$$\rho = \frac{188,8}{172,0 - A^C - (CO_2)_K^C} \text{ г/см}^3.$$

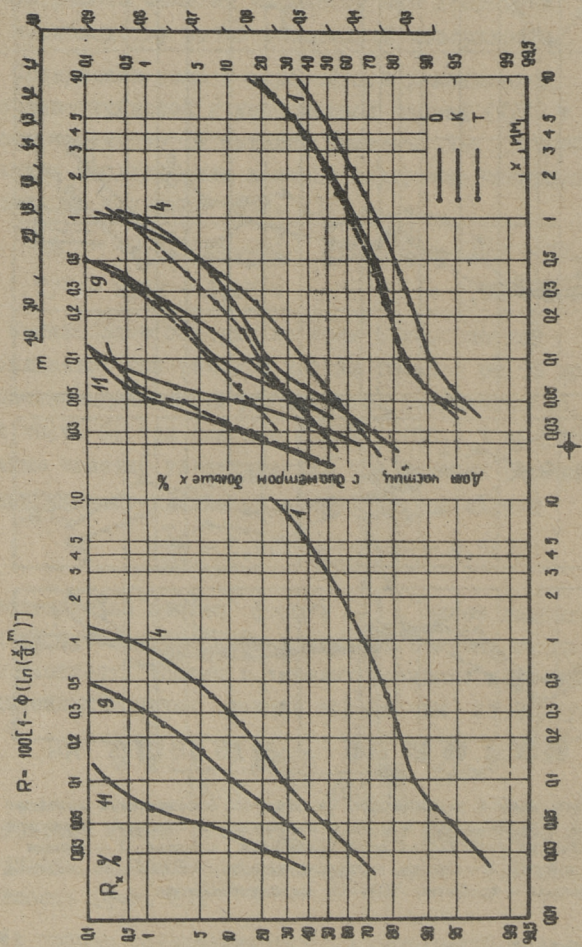
Наибольшие куски дробленых сланцев имеют наибольшую среднюю плотность, а частицы с размерами 0,03 - 0,1 мм — наименьшую плотность (фиг. 2).

На основе содержания золы, карбонатной углекислоты и данных ситового анализа определено массовое распределение органической, карбонатной и песчано-глинистой (терригенной) частей в пробе топлива (граф. 1 на фиг. 3). Методика полу-



Фиг. 2. Содержание золы и углекислоты карбонатов, соотношение песка+глинистой и карбонатной частей и плотность по ситовым фракциям и в среднем по всей массе проб дробленых сланцев. 1 - сланцы шахтной добычи; 2 - сланцы открытой добычи; 3 - обычное топливо, измельченное в дробилке ЛДМ-1А мехопробователя

чения этих графиков такая же, как в [6]; использованные при вычислениях формулы приведены в [7]. Распределение органической и песчано-глинистой частей по всем приведенным ситовым фракциям топлива практически совпадает. График распределения



Фиг. 8. Массовое распределение всей пробы измельченных сланцев и ее органической (O), карбонатной (K) и песчано-глинистой (T) частей по ситовым фракциям в логарифмически-нормальной сетке.
 1 - дробленые сланцы, шактовой добычи; 4 - грубая пыль обычного топлива; 9 - тонкая пыль сланцев открытой добычи; 11 - очень тонкая пыль лабораторного помола

карбонатной части направлен так же, но расположен ниже, т.е. карбонатное вещество содержится преимущественно в более крупных частицах.

2. Крупность и равномерность пыли

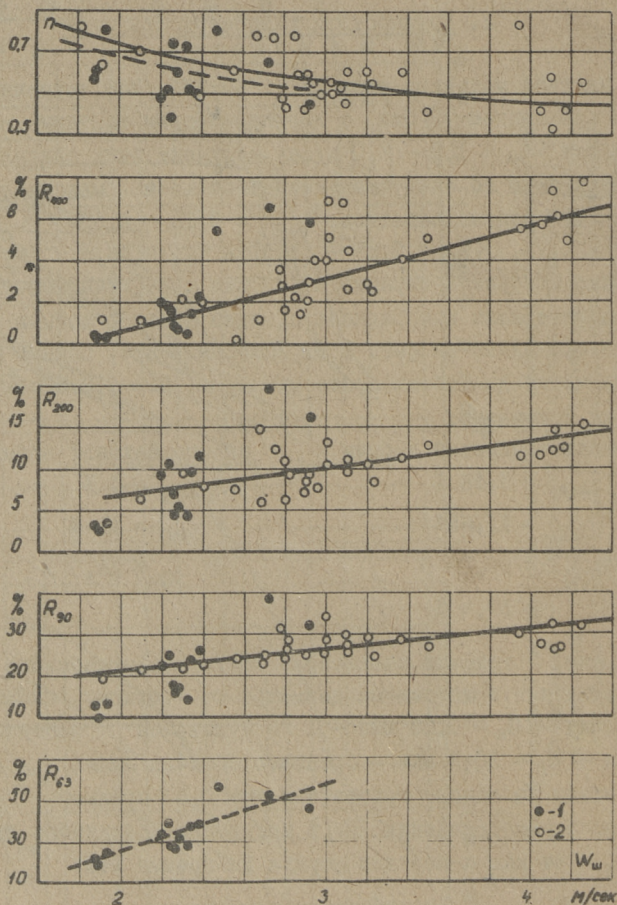
В шахтной мельнице типа ШМТ 1300/2564/740 (встречно-винтовым креплением 75 бил) с цилиндрическим шахтным сепаратором при $w_{ш} = 1,8 - 3,0$ м/сек получена пыль сланцев открытой добычи со следующими минимальными и максимальными значениями полных остатков: $R_{400} = 0,26 - 6,5\%$, $R_{200} = 2,56 - 20,7\%$, $R_{90} = 9,85 - 42,3\%$ и $R_{63} = 18,8 - 56,0\%$. Приведенные интервалы зернового состава шире, чем соответствующие интервалы при размоле сланцев шахтной добычи [3], что хорошо видно на фиг. 1 по полосам 3 и 4. Однако средние значения для обеих полос при $w_{ш} = 1,8 - 3,0$ м/сек практически совпадают:

сланцы открытой добычи	сланцы шахтной добычи
$R_{400} = 3,38\%$	$R_{400} = 3\%$
$R_{200} = 11,63\%$	$R_{200} = 11\%$
$R_{90} = 26,07\%$	$R_{90} = 24,5\%$
$R_{63} = 37,4\%$	

На фиг. 1 графики счетного $N(x)$ и поверхностного $F(x)$ распределения и медианные диаметры по счетному количеству частиц - $d_N = 0,56$ мкм - и по суммарной поверхности частиц - $d_F = 10,3$ мкм - среднего состава пыли сланцев определены на основе показателя $m = 0,83$ среднего графика массового распределения $S(x)$ и массового медианного диаметра $d_S = 44$ мкм с помощью формул диаграммы КОЭ:

$$d_F = d_S \cdot e^{-\left(\frac{1}{m}\right)^2} \quad \text{и} \quad d_N = d_S \cdot e^{-3\left(\frac{1}{m}\right)^2}$$

Для шарообразной формы частиц графики $N(x)$ и $F(x)$ проходят соответственно через точки d_N и d_F на линии 50%-ного остатка и параллельны к $S(x)$. Графики $S(x)$, $F(x)$ и $N(x)$ компактно и



Фиг. 4. Зерновой состав пыли эстонских горючих сланцев, выдаваемый цилиндрической шахтой, в зависимости от скорости аэромеси $W_{ш}$. 1 - сланцы открытой добычи; 2 - сланцы шахтной добычи [3]; η - показатель равномерности по R_{90} и R_{200}

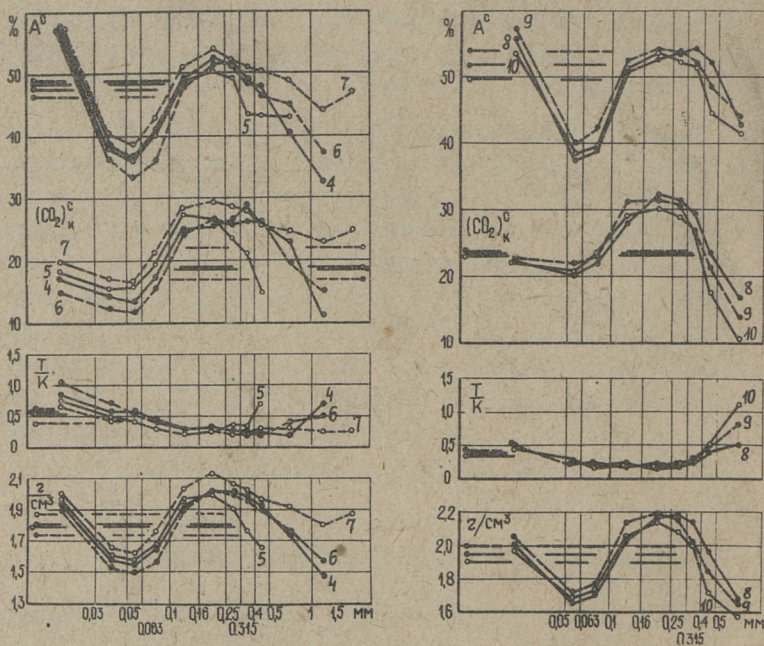
наглядно изображают массовое, поверхностное и счетное распределение частиц пыли сланцев в зависимости от их размера x (фиг. 1).

На фиг. 4 представлены данные о крупности и равномерности пыли сланцев открытой и шахтной добычи в зависимости от скорости аэросмеси в цилиндрической шахте. На фигуре заметно, что при возрастании скорости аэросмеси в шахте пыль сланцев открытой добычи грубеет быстрее, чем пыль сланца шахтной добычи, что может показаться и из-за недостаточного количества точек на фигуре для сланцев открытой добычи. На основе фиг. 4 при $w_{ш} = 1,8 - 3,0$ м/сек показатель равномерности пыли по остаткам R_{90} и R_{200} , то есть $n_{90/200} = 0,7 - 0,6$ для сланцев открытой добычи и для сланцев шахтной добычи $n_{90/200} = 0,74 - 0,63$.

3. О вещественном составе ситовых фракций пыли

Распределение содержания золы, карбонатной углекислоты и средняя плотность частиц по фракциям пыли сланцев открытой добычи и пыли сланцев обычного топлива имеют, примерно, одинаковый характер (фиг. 5). Плотность и содержание A и $(CO_2)_k$ по фракциям пыли сланцев имеют дважды большие значения — в области частиц с размерами менее 30 — 50 мкм и в промежутке размеров от 100 до 400 мкм. Частицы с размерами от 30 — 50 до 100 мкм характеризуются сравнительно малой плотностью и малым содержанием золы и карбонатной углекислоты. Интересно отметить, что на фиг. 2 в тонкой части топлива, при размерах частиц менее 0,5 мм, распределение содержания золы по фракциям имеет такой же характер, как по фракциям пыли на фиг. 5.

Особо тонкие частицы пыли сланцев с размерами менее 15 мкм, уловленные в электрофилтре лабораторной пылеприготовительной установки с шаровой мельницей 40-МЛ, имеют значительно большее содержание золы и незначительно мень-



Фиг. 5. То же, что на фиг. 2 для проб пыли сланцев
 ча Прибалтийской ГРЭС. 4, 5, 6 и 7 - пыль сланцев
 обычного топлива соответственно из мельниц
 14А, 17Б, 19Г и 20Г; 8, 9 и 10 - пыль
 сланцев открытой добычи из мельницы 2А

шее содержание карбонатной углекислоты, чем во всей пробе
 пыли: пыль из электрофилтра

$$A^C = 68,9-75,0\%; (CO_2)_K^C = 11,9-22,3\%;$$

вся проба пыли

$$A^C = 49,2-52,3\%; (CO_2)_K^C = 19,6-23,0\%.$$

Характерные результаты распределения всей массы пыли и
 ее составных частей в 3-х пробах различной тонкости помола
 представлены на фиг. 3. Графики составных частей для пыли
 построены также как для дробленых сланцев пробы I. По гра-
 фикам 4 и 9 не наблюдается существенной разницы в характе-

ре распределения составных частей в пыли сланцев открытой и шахтной добычи. Приведенные графики подтверждают выводы И.П. Эпика в [6]: при тонкости измельчения $R_{90} > 10\%$ карбонатная часть преобладает в более крупных частицах и песчано-глинистая часть — в мельчайших частицах. При $R_{90} = 0,3\%$ (граф. II) органическая часть преобладает в крупных частицах и песчано-глинистая и карбонатная части измельчаются почти одинаково. В промышленной пыли сланцев (4 и 9) органическая часть в целом заметно отклоняется от логарифмически-нормального распределения вследствие ее малого содержания (около 7-15%) в частицах 100-400 мкм и увеличенного содержания в частицах 30-100 мкм.

4. Определение показателя равномерности

В теплоэнергетике показателем равномерности измельченного материала пользуются при характеристике зернового состава измельченного твердого топлива. Он входит в формулу удельной поверхности пыли и т.д. Поэтому представительное определение показателя равномерности имеет большое значение.

Понятие показателя равномерности (или коэффициента полидисперсности, показателя полидисперсности, коэффициента равномерности, показателя внутренней структуры, константы равномерности и т.д.) связано с прямолинейными на диаграмме РРБ или КФХ графиками массового распределения измельченного материала. Величина показателя равномерности равна тангенсу угла наклона графика к оси размеров частиц и обозначается на диаграмме РРБ буквой n и на диаграмме КФХ — буквой m .

Для графического определения величины n или m по среднему направлению не очень прямолинейного графика или по двум значениям полных остатков R следует провести линию из по-

луса диаграммы параллельно к графику массового распределения до пересечения с добавочной шкалой значений n или m . По двум значениям полных остатков R показатель n определяется общеизвестной формулой и

$$m = \frac{\Phi^{-1}(1 - 0,01 \cdot R_{x_2}) - \Phi^{-1}(1 - 0,01 \cdot R_{x_1})}{\ln x_2 - \ln x_1},$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ функция Гаусса,

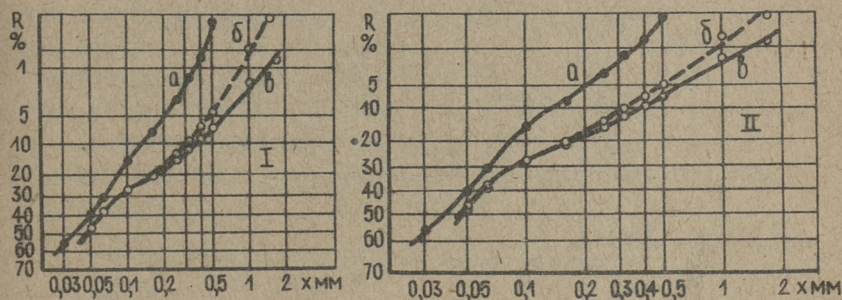
и если $\Phi^{-1}(1 - 0,01 \cdot R) = c$, то $\Phi(c) = 1 - 0,01 \cdot R$.

Все графики массового распределения горючих сланцев, размолотых в молотковых и шаровых барабанных мельницах, имеют менее или более выраженные искривления одного и того же характера в области размеров частиц от 70 до 250 мкм, т.е. именно в той области, по которой обычно определяют показатель равномерности всей пыли. Названные искривления графиков наблюдаются как в $\lg - \lg \lg$ сетке диаграммы РРБ, так и в логарифмически-нормальной сетке диаграммы КФЖ (см. фиг. 1, 3 и 6) и обусловлены неодинаковыми свойствами измельчения составных частей горючих сланцев (см. графики О, К и Т на фиг. 3).

На фиг. 6 приведены графики массового распределения 3-х характерных проб пыли горючих сланцев на Прибалтийской ГРЭС в логарифмически-нормальной сетке с сокращенной осью x и в $\lg - \lg \lg$ сетке. Из-за непрямолинейности этих графиков показатель равномерности m имеет различные значения на различных участках графика. То же наблюдается при показателе n . Например, графики массового распределения пыли — а и б на фиг. 6 — имеют следующие значения m и n :

график	а	б	график	а	б
$m_{90/400}$	1,05	0,50	$n_{90/400}$	0,72	0,44
$m_{90/200}$	0,91	0,45	$n_{90/200}$	0,67	0,41

	a	b		a	b
m 50/100	1,09	0,74	n 50/100	1,05	0,76
m 63/400	1,08	0,56	n 63/400	0,80	0,50.

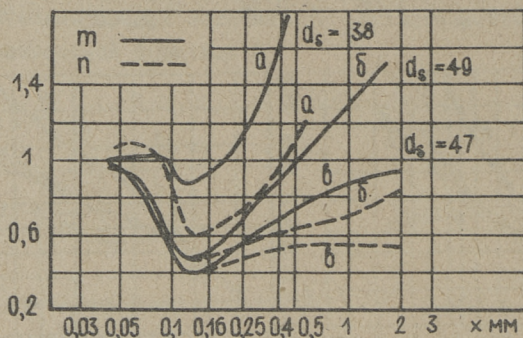


Фиг. 8. Графики массового распределения пыли сланцев молотковых мельниц в логарифмически-нормальной координатной сетке I и в $\lg-\lg\lg$ сетке II. а - тонкая пыль из мельницы 2А с гравитационным сепаратором; б - грубая пыль из мельницы 14А с гравитационным сепаратором; в - грубая пыль из мельницы 19Г с инерционным сепаратором

Для обоих графиков а и б значения показателя равномерности, определенные по R_{90} и R_{200} , т.е. $m_{90/200}$ и $n_{90/200}$, имеют самые малые значения. Еще более малые значения имели бы показатели равномерности $m_{100/160}$ и $n_{100/160}$. Приведенные здесь значения показателя равномерности определены графически.

Направление графика массового распределения или равномерность измельченных горючих сланцев по данным седиментометрических анализов (частицы с размерами 8-30 мкм) в логарифмически-нормальной сетке преимущественно продолжает направление, заданное ситовыми остатками R_{90} и R_{50} и создает сравнительно близкий и прямой общий график распределения сланцев (5 на фиг. I). В $\lg-\lg\lg$ сетке направление графика по данным седиментометрического анализа имеет тенденцию существенно отклониться вниз и общий график распределения по всей длине уже намного отличается от пря-

мого графика. Изложенное здесь говорит в пользу применения логарифмически-нормальной сетки.

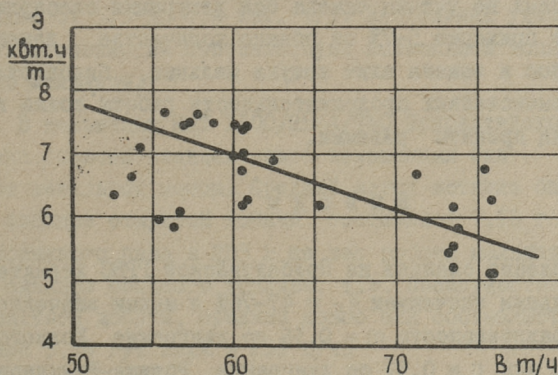


Фиг. 7. Локальные значения показателя равномерности трех характерных проб пыли сланцев при различной величине массового медианного диаметра d_s ; а, б и в — те же, что на фиг. 6

Локальные значения показателей равномерности, определенные направлением касательной к графикам а, б и в фиг. 6, приведены на фиг. 7. Локальные показатели равномерности m и n имеют наименьшие значения около размеров частиц 140 мкм, относительно одинаковые значения у размеров частиц 50–63 мкм и очень большие колебания в значениях при больших размерах частиц. Из-за последнего обстоятельства обычная оценка содержания крупных частиц в пыли на основе $\Pi_{90/200}$ может быть весьма неточной. При более тонкой пыли (по значению массового медианного диаметра d_s) наблюдается тенденция к более высоким значениям локальных показателей равномерности, что сходится с выводами [2].

5. Расход электроэнергии на размол и износ
бил мельниц

На основе проведенных измерений (фиг. 8) средний удельный расход электроэнергии четырех мельниц на размол сланцев открытой добычи увеличивается от 5,5 до 7,6 квт.ч/т при уменьшении топливной нагрузки этих мельниц одного и того же котла от 77,5 до 52,5 т/ч. Такой удельный расход электроэнергии на размол сланцев открытой добычи в мельницах ШМТ 1300/2564/740 примерно на одну треть больше, чем при размоле сланцев шахтной добычи .



Фиг. 8. Зависимость удельного расхода электроэнергии на размол сланцев открытой добычи от суммарной топливной нагрузки четырех мельниц котла

Ниже приведены некоторые данные об износе бил мельниц типа ШМТ 1300/2564/740 за полугодовой период времени. За 6 месяцев работы (октябрь 1963 по март 1964) в 4-х мельницах котла № 2, работавшего на сланцах открытой добычи, было заменено 1441 изношенное било новыми. В то время в таких же мельницах котлов № 1,3,4,5 и 6, работавших на сланцах обычного топлива, среднее количество замененных бил на котел составляло 1102 штуки. Средняя масса нового

была составляла 8,4 кг, изношенного - 5,62 кг и отсюда потеря износом 2,78. В течение названного периода времени потеря металла от износа бил в мельницах котла ТП-17 составляла при сланцах открытой добычи 7,18 г на тонну пара и при сланцах обычного топлива 5,95 г/т пара. Полный расход металла с учетом выбрасываемого остатка составляет соответственно 21,7 и 17,9 г на тонну пара. Износ и расход металла бил на час работы одной мельницы составляет при размоле сланцев открытой добычи соответственно 285 и 862 г и при размоле сланцев обычного топлива 231 и 697 г. В приведенных данных не учтены замена бил дежурными слесарями, что составляет примерно 5-7% от общего количества замененных бил, и износ и замена плит кожуха мельниц, билодержателей и т.д. В вычислениях продолжительности работы котла и всех его мельниц приняты равными.

В ы в о д ы

1. Дробление сланцев на Прибалтийской ГРЭС характеризуется с большим значением $R_5 = 47-76\%$ и малым значением показателя равномерности $m = 0,36$ по диаграмме Колмогорова-Фая-Желева или $n = 0,57$ по диаграмме Розина-Рамллера-Беннета.

2. Зерновой состав пыли сланцев открытой добычи характеризуется следующими средними значениями $R_{400} = 3,4\%$, $R_{200} = 11,6\%$, $R_{90} = 26,1\%$, $R_{63} = 37,4\%$ и показатель равномерности по направлению графика массового распределения $m = 0,83$ или $n = 0,6-0,7$, что практически одинаковы с соответствующими данными И.Е. Дубовского и М.В. Патроновой для пыли сланцев шахтной добычи [3].

3. Распределение содержания золы и карбонатной углекислоты по ситовым фракциям пыли сланцев открытой добычи и пыли сланцев обычного топлива на станции имеют одинаковый характер.

4. Из-за характерной непрямолинейности графиков массового распределения показатель равномерности пыли сланцев по R_{90} и R_{200} имеет местное, очень низкое значение, не характерное для всей пыли. Показатели равномерности, определенные по остаткам R_{63} или менее, и R_{315} или более, т.е. $m_{63/315}$, $m_{63/400}$, $m_{50/500}$ и т.д., как правило, больше значений $m_{90/200}$ (также для n) и представительнее характеризуют пыль сланцев как в крупной, так и в тонкой части.

5. При топливной нагрузке мельницы ШМТ 1300/2564/740 от 19,4 до 13,1 т/ч средний удельный расход электроэнергии на размол сланцев открытой добычи с $Q_P^D \approx 5860-9630$ кДж/кг составляет от 5,5 до 7,6 квт. ч/т. Наибольший удельный расход электроэнергии соответствует наименьшей топливной нагрузке мельницы.

6. В мельницах ШМТ 1300/2564/740 Прибалтийской ГРЭС при размолу горючих сланцев износ замененных бил составляет 33% от начальной массы. Средний износ металла бил при размолу сланцев открытой добычи составляет 7,18 г на тонну выработанного пара и 285 г на час работы мельницы. При размолу сланцев обычного топлива, т.е. преимущественно сланцев шахтной добычи, средний износ бил составляет соответственно 5,94 г/т пара и 231 г/ч.

Л и т е р а т у р а

1. Gy. Fay, V. Zselev, Grundlagen der Zerkleinerungstheorie. Energietechnik, 1962, Nr. 11, 12.

2. Л.М. Нйспуу. Использование диаграммы Колмогорова-Фая-Хелева при исследовании некоторых рассевов эстонских горючих сланцев. Труды ТПИ, серия А, № 226, 1965.

3. И.Е. Дубовский и М.В. Патронова. Исследование работы бильных мельниц на сланцах. "Теплоэнергетика", 1964, № 2.

4. Hans Witte. Handbuch der Energiewirtschaft, Band I, Berlin, 1957.

5. Нормы расчета и проектирования пылеприготовительных установок. Ред. М.Л. Кисельгоф и Н.В. Соколов. М.-Л., Госэнергоиздат, 1958.

6. И.П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Таллин, Эст.гос.изд., 1961.

7. Г.К. Саар. Определение состава эстонского сланца-кукерсита и количества образующейся золы по данным промышленного анализа. Труды ТПИ, серия А, № 205, 1963.

УДК 662.87:662.67.004.12

Н.С.Розанов, Г.А.Соо, Л.М.Нйспу

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ МЕЛКОЙ ЧАСТИ ПЫЛИ СЛАНЦЕВ^Ж

Приведены некоторые данные седиментометрического и микроскопического исследования частиц пыли эстонских горючих сланцев, недоступных ситовому анализу. Данные обработаны в логарифмически-нормальной сетке диаграммы Колмогорова-Фая-Желева.

1. Постановка проблемы

В настоящее время в республике размалывают более 10 млн. тонн горючих сланцев в год для пылевидного сжигания в энергетических и технологических установках. Это количество будет интенсивно возрастать и в последующие годы.

При пылевидном сжигании сланцев большое значение имеет качество пыли, т.е. распределение частиц по размерам или зерновой состав и вещественный состав размерных фракций пыли. Зерновой и вещественный составы частиц пыли сланцев с размерами более 30 - 50 мкм изучаются посредством ситового анализа. Но в промышленной пыли сланцев частицы с размерами более 30 мкм составляют примерно 50 - 70% всей массы пыли. Качество остальной массы самых мелких частиц пыли

^Ж Работа выполнена под руководством проф., доктора техн. наук И.П. Эпика.

изучено недостаточно. Неизвестны форма мелких частиц, а также размеры наименьших имеющихся частиц.

Изучение распределения частиц с размерами менее 30 мкм позволяет проверить предполагаемый логарифмически-нормальный характер и равномерность их распределения. Данные распределения этих мельчайших частиц могут существенно уточнить теоретическое определение счетного количества частиц пыли и величины ее удельной поверхности, так как частицы пыли сланцев с размерами менее 30 мкм по диаграмме Колмогорова-Фая-Желева [1] составляют около 99,9% от общего счетного количества частиц и около 80 - 90% суммарной поверхности пыли [2, 3].

Следовательно, исследование мелкой части пыли должно дать ответы многим проблемам качества пыли горючих сланцев.

2. Седиментометрический анализ пыли

Для седиментометрического анализа частиц пыли сланцев с размерами менее 50 мкм применялись стеклянные плоскопружинные седиментометрические микровесы Фигуровского с чашечкой ([4] фиг. 55) и катетометр КМ-6 для отсчета деформации пружины.

Сделано 26 седиментометрических анализов десяти различных проб измельченных сланцев, в результате чего в этих пробах определено седиментометрическое распределение массы частиц с размерами от 8 до 30 мкм. Характерные данные седиментометрического и ситового анализа проб пыли сланцев приведены в логарифмически-нормальной сетке Колмогорова-Фая-Желева (КФЖ) под номерами 2 на фиг. 2 и 3. Из-за различия методов и большой разницы плотностей составных частей горючих сланцев (около 2,5 раза) данные седиментометрического анализа не полностью совместимы с данными ситового анализа и поэтому применяются лишь для оценки массового распределения частиц с размерами 8 - 30 мкм. Данные седиментометрического анализа в сетке КФЖ и в $\lg - \lg \lg$ сетке Розина-Раммле-

ра (РР) более или менее плавно продолжают направление, заданное графику массового распределения ситовым анализом. Однако в сетке РР эти данные существенно отклоняются вниз от прямолинейного направления, заданного полными остатками на ситах 90 и 200 мкм, т.е. R_{90} и R_{200} . В сетке же КФЭ эти данные значительно меньше отклоняются от этого направления. Следовательно, массовое распределение частиц пыли сланцев с размерами более 8 мкм больше соответствует логарифмически-нормальному характеру распределения, чем распределению по РР. Седиментометрический анализ показывает также, что в промышленной пыли сланцев частицы с размерами менее 8 мкм составляют порядка 7 - 14% от всей массы пыли.

3. Анализ пыли под оптическим микроскопом

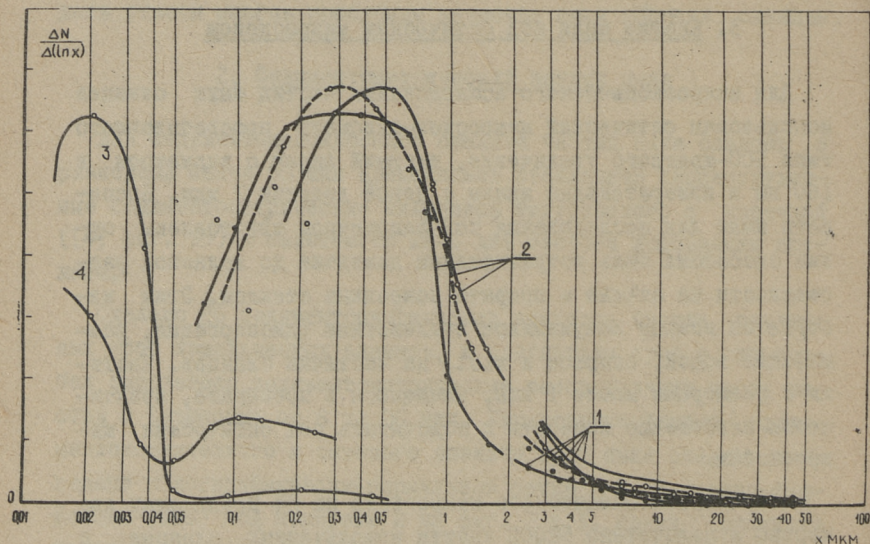
Для микроскопического исследования частиц пыли сланцев использован оптический микроскоп-ланометр просвечивающего типа 500-кратного увеличения, имеющий экран с диаметром в 160 мм и измерительные шкалы с ценой деления 2 мкм. Препараты пыли для исследования под ланометром изготовлены следующим способом: пыль встряхиванием доведена до желаемой рассеянности на стекле и покрыта покровным стеклом. Этим избегается всякое вынужденное воздействие (диспергация, размывание водой, спиртом и т.п.) на частички сланцев. Частицы с размерами менее 1 мкм, имеющиеся в препарате, практически невозможно измерить и подсчитать под оптическим микроскопом.

Посредством оптического микроскопа на 24 препаратах измерено и подсчитано 52000 частиц измельченных сланцев с размерами от 1 до 50 мкм. Эти исследованные частицы взяты из одиннадцати различных проб пыли и тонких фракций топлива. Первоначальная обработка подсчитанных по размерным интервалам частиц проведена для определения плотности их счетного распределения посредством выражения

$$\frac{\Delta N}{\Delta(\ln x)}$$

где ΔN — счетное количество частиц в интервале размеров частиц от x_i до x_{i+1} и $\Delta(\ln x) = \ln x_{i+1} - \ln x_i$ — длина данного интервала размеров на натурально-логарифмической оси.

В результате такой обработки данных подсчета частиц установлено, что во всех исследованных пробах измельченных сланцев на логарифмической оси размеров плотность счетного распределения частиц с размерами 2 — 50 мкм ускоренно возрастает в сторону малых размеров так, как это демонстрируют графики I на фиг. 1. Эти графики, построенные на основе гистограмм, показывают, что наибольшую плотность счетного



Фиг. 1. Графики плотности счетного распределения частиц пыли сланцев молотковой мельницы Прибалтийской ГРЭС: 1 — частицы, измеренные под оптическим микроскопом; 2 — то же, в электронном микроскопе; 3 и 4 — "распыление" частиц под сильным облучением в электронном микроскопе.

распределения должны иметь на логарифмической оси размеров частицы с размерами менее 1 - 2 мкм. Такие мелкие частицы видны лишь в электронном микроскопе.

4. Анализ пыли при помощи электронного микроскопа

Для исследования самых мелких частиц пыли эстонских горючих сланцев использован просвечивающий электронный микроскоп ЭМ-5. До и после опытов увеличение в электронном микроскопе определялось и проверялось тест-объектом в виде золотой реплики (отпечатка) дифракционной решетки с постоянной 1/600 мм. Во время опытов увеличение поддерживалось постоянным по показаниям специального миллиамперметра, измеряющего ток в проекционной линзе. Измерение и подсчет большого количества частиц проводились с помощью выносной шкалы, помещаемой на стекло наблюдательного окна микроскопа.

В электронном микроскопе пыль сланцев исследовалась самым простым — прямым методом, т.е. нанесением пробы на пленку-подложку. В качестве пленки-подложки использовалась угольная пленка, полученная испарением и конденсацией угля в вакууме, которая поддерживалась медной сеткой с ячейками в 60 мкм. На такой объекто-держателе пробы сланцевой пыли наносились методом сухого порошка.

В электронном микроскопе при увеличениях 6000-33000 раз измерены и подсчитаны по размерным фракциям 17000 частиц пыли сланцев с размерами от 2 до 0,02 мкм, приготовленные для исследования на 18 объекто-держателях и представляющие частицы пяти проб промышленной пыли. Эти пробы отобраны трубкой Альнера из четырех мельниц типа ПМТ 1300/2564/740 Прибалтийской ГРЭС, и одна проба взята из пылеприготовительной системы с шаровой барабанной мельницей типа ШМ 280/600 на цементном заводе Пунане Кунда. Микроскопически

измеряемым размером частиц принят меньший габаритный размер проекции частицы.

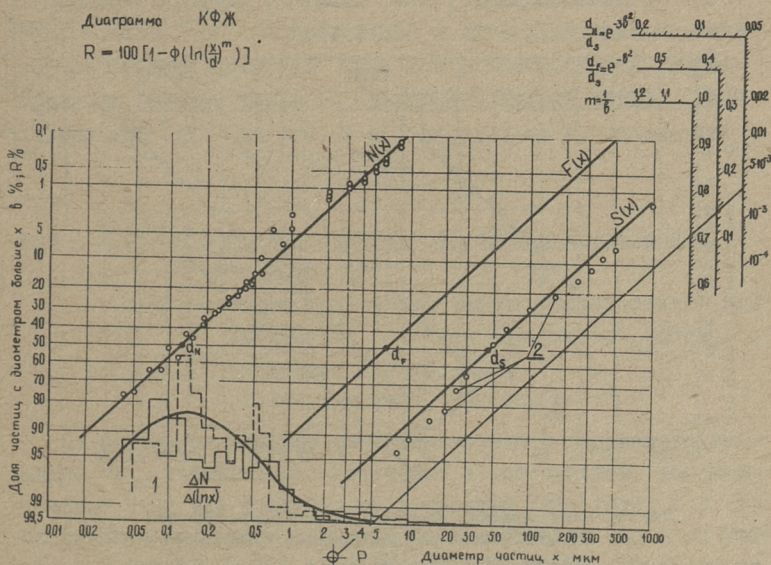
В электронном микроскопе увеличения в 33000 раз и больше осуществляются при сильном освещении (электронном облучении) препарата. При сильном облучении в частицах горючих сланцев, помещенных в электронный микроскоп, наблюдаются изменения. Оплавляются острые выступы отдельных частиц; появляются расплавленные частицы в жидко-подвижном состоянии; наблюдается даже взрывообразное или испарительно-конденсационное "распыление" некоторых частиц на большое количество очень мелких частичек с размерами порядка $0,01 \mu\text{м}$. Такое распределение "распыленных" частиц показано графиками 3 и 4 фигуры I. Резкое возрастание плотности счетного распределения частиц по графикам 3 и 4 на \ln -шкале при размерах менее $0,05 - 0,04 \mu\text{м}$ указывает на вторичный процесс образования мельчайших частиц. Максимум плотности распределения новых частиц находится около размеров $0,01 - 0,02 \mu\text{м}$ или менее. Во избежание появления таких "лишних" частичек необходимо было работать на электронном микроскопе в режиме небольшого освещения или при увеличениях в 20000 раз и менее. В результате этого и не удалось исследовать счетное распределение частиц с размерами менее $\sim 0,04 \mu\text{м}$.

5. Счетное распределение частиц

Общее количество частиц пыли сланцев, измеренных и подсчитанных под электронным микроскопом $\Sigma(\Delta N)_{эл.}$ и то же под оптическим микроскопом $\Sigma(\Delta N)_{опт.}$ для одной и той же пробы, но по различным препаратам, приведено по величине в соответствии следующим образом. Величина $\Sigma(\Delta N)_{эл.}$ или $\Sigma(\Delta N)_{опт.}$ изменена так, чтобы построенные на основе соотношения $\Delta N / \Delta(\ln x)$ графики плотности счетного распределения по данным оптического и электронного микроскопов (граф. I и 2

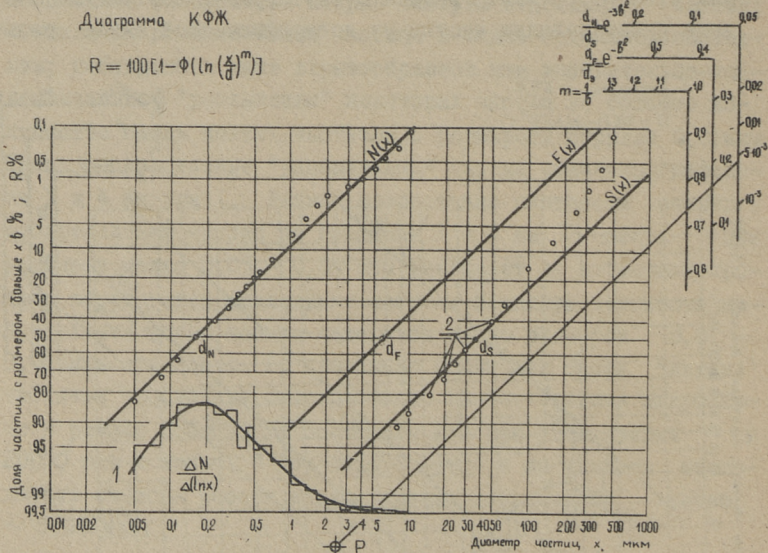
на фиг. 1) имели бы плавный переход около размеров частиц 2 мкм. При этом изменение общего количества подсчитанных частиц $\Sigma(\Delta N)$ проведено пропорциональным увеличением или уменьшением ΔN по всем размерным фракциям.

В результате вышеописанного метода обработки данных измерения и подсчета частиц максимумы плотности счетного распределения всех исследованных проб определены в пределах 0,08 - 0,4 мкм. Графики и гистограммы плотности счетного распределения частиц на логарифмической шкале разме-



Фиг. 2. Распределение размеров частиц пыли горючих сланцев молотковой мельницы с инерционным сепаратором: 1 - гистограммы плотности счетного распределения; 2 - данные ситового и седиментометрического анализа; $N(x)$ - график счетного распределения, построенный по гистограммам; $F(x)$ и $S(x)$ - графики распределения поверхности и массы, построенные на основе

ров для трех характерных проб пыли сланцев приведены под номерами 1 и 2 на фиг. 1 и под номером 1 на фиг. 2 и 3. Эти графики имеют вид незаконченных, но достаточно четко выраженных кривых нормального распределения. Незаконченными они являются со стороны не исследованных по вышеизложенным причинам мельчайших частиц с размерами менее $\sim 0,04$ мкм. В результате же полученного можно утверждать, что счетное



Фиг. 3. Распределение размеров частиц пыли горючих сланцев молотковой мельницы с гравитационным сепаратором. 1; 2; $N(x)$; $F(x)$ и $S(x)$ — то же, что на фиг. 2.

распределение частиц пыли сланцев с размерами $0,04-30$ мкм имеет логарифмически-нормальный характер. По гистограммам 1 фиг. 2 логарифмически-нормальный характер распределения наблюдается менее выразительно, чем на фиг. 1 и 3, что объясняется малым количеством измеренных и подсчитанных частиц для получения гистограмм фиг. 2.

При нормальном счетном распределении частиц максимуму плотности распределения соответствует счетный медианный диаметр d_N . Диаметр d_N означает, что счетное количество частиц с диаметром более d_N составляет половину от всего счетного количества измельченного материала (см. фиг. 2 и 3).

Если счетное распределение частиц логарифмически-нормальное, то распределение поверхности и массы частиц шарообразной формы тоже логарифмически-нормальное [2] и интегральные графики счетного $N(x)$, поверхностного $F(x)$ и массового $S(x)$ распределения в логарифмически-нормальной сетке диаграммы КФЖ фиг. 2 и 3 изображаются параллельными прямыми линиями. Экспериментальные точки для проведения $N(x)$ на фиг. 2 и 3 определены по выражению

$$N_x = \frac{100 \sum_x^{\infty} (\Delta N)}{N} \% ,$$

где $\sum_x^{\infty} (\Delta N)$ — счетное количество частиц с размерами больше x ;

N — общее количество частиц, определенное как двукратное счетное количество частиц с размерами больше d_N ;

x — размер (диаметр) частиц.

На основе показателя равномерности m и медианного диаметра d_N счетного распределения и посредством дополнительных шкал или соотношений диаграммы КФЖ (фиг. 2 и 3) определены медианные диаметры по поверхности d_F и по массе d_S . Через d_F и d_S проведены прямые линии параллельно к $N(x)$ и получены теоретические графики поверхностного и массового распределения $F(x)$ и $S(x)$. Удовлетворительное совпадение графика $S(x)$ с данными ситового и седиментометрического анализа этих же проб пыли сланцев (точки 2 на фиг. 2 и 3) показывает достоверность экспериментально найденного счетного распределения частиц. Некоторое отклонение точек ситового анализа на фиг. 3 для грубой части пыли от графика $S(x)$ объясняется действием сепаратора

на наибольшие частицы и показывает непостоянство показателя равномерности m для этих частиц.

6. Микроскопическая характеристика мелких частиц

Для микроскопической характеристики мелких частиц пыли эстонских горючих сланцев использованы вышеописанные электронный микроскоп (ЭМ) и оптический микроскоп (ОМ), что позволило провести наблюдения частиц в размерных интервалах 0,02 - 4 мкм и I - 50 мкм. В обоих случаях препараты изготовлялись также сухим способом и преимущественно после просушки пробы. По проекциям частиц измерялись два габаритных размера в перпендикулярных направлениях, меньший из которых принят за размер частицы. В то же время оценивались степень прозрачности частиц и соответствие формы частиц простейшим геометрическим телам.

Аналізу подверглись под ОМ около 5000 частиц и в ЭМ около 8000 частиц из пяти проб пыли. Три пробы пыли отобраны из различных молотковых мельниц Прибалтийской ГРЭС при размоле сланцев с низшей теплотой сгорания 9290, 11585 и 13070 кДж/кг.

Во всех исследованных пробах пыли сланцев присутствуют частицы с различной степенью прозрачности под световыми лучами в ОМ и под электронными лучами в ЭМ. В электронном микроскопе разделение частиц на непрозрачные (черные), полупрозрачные (неравномерно серые) и прозрачные (лишь немного темнее общего фона) наблюдается более четко, чем под ОМ. При повышении интенсивности электронного луча в ЭМ раньше начинают оплавляться непрозрачные частички сланцев.

Анализ 2-х специально приготовленных проб пыли сланцев с большим и малым содержанием органического вещества ($A^G = 23,1\%$ и $(CO_2)_K^G = 4,4\%$; $A^G \approx 55\%$ и $(CO_2)_K^G \approx 30\%$) показал, что при исследовании в ЭМ проба с большим содержанием органического вещества имеет примерно на 20% меньше непрозрачных частиц, чем другая проба. Такая же тенденция

наблюдается при исследовании трех названных проб пыли сланцев Прибалтийской ГРЭС: с увеличением теплоты сгорания количество непрозрачных частиц в ЭМ уменьшается.

В трех промышленных пробах пыли сланцев полупрозрачные в ЭМ и под ОМ частицы составляют в обоих случаях около 50%. Прозрачные под электронными лучами частицы составляют относительно малое счетное количество - около 2 - 20%, прозрачные под световыми лучами - 2 - 4%.

В пробах пыли сланцев форма частиц по их проекциям на экран, в основном, неправильная с различной степенью остроты углов для непрозрачных частиц. Среди непрозрачных частиц имеются и частицы правильной формы (призмы, параллелепипеды и т.д.) Для частиц с размерами менее 0,2 мкм из-за относительно малых для ЭМ увеличений было затруднительно четко различить их форму и степень прозрачности.

Около 48% частиц, измеренных под обоими микроскопами, имеют соотношение перпендикулярных габаритных размеров проекции в пределах 1 - 1,2. Продолговатых частиц с соотношением размеров более 2-х наблюдается мало - около 14%, с соотношением более 3-х - около 2,5%.

В ы в о д ы

1. По результатам седиментометрического анализа промышленной пыли эстонских горючих сланцев частицы с размерами менее 8 мкм составляют порядка 7 - 14% от всей массы пыли.

2. На логарифмической оси размеров плотность счетного распределения частиц с размерами 2 - 50 мкм ускоренно возрастает в сторону малых размеров.

3. В электронном микроскопе ЭМ при прямом методе исследований пыли горючих сланцев удалось в неизменном состоянии рассматривать частицы с наименьшими размерами порядка 0,02 мкм.

4. На основе микроскопических исследований счетное распределение частиц пыли горючих сланцев с размерами 0,04 - 30 мкм и более имеет логарифмически-нормальный характер.

5. Для пяти различных проб промышленной пыли горючих сланцев счетные медианные диаметры d_n определены в пределах 0,08 - 0,4 мкм.

6. В просвечивающих электронных и оптических микроскопах частицы пыли сланцев с размерами от 0,02 до 50 мкм различаются по степени их прозрачности. При повышении интенсивности электронного луча в ЭМ раньше начинают оплавляться непрозрачные частицы. С увеличением минеральной части в пробах пыли наблюдается увеличение количества непрозрачных в ЭМ частиц.

7. Частицы пыли сланцев по их проекциям на экран в основном представляются неправильной формы. Встречаются непрозрачные частицы подобные призмам, параллелепипедам и т.д. Около половины частиц с размерами 0,02 - 50 мкм имеют соотношение перпендикулярных габаритных размеров проекции в пределах 1 - 1,2. Продолговатых частиц с соотношением размеров более 2-х наблюдается около 14%, с соотношением более 3-х - около 2,5%.

Л и т е р а т у р а

1. Gy, Fay, V. Zselev. Grundlagen der Zerkleinerungstheorie. Energietechnik, 1962, Nr. 11, 12.
2. Л.М. Ииспуу. Использование диаграммы Колмогорова-Фая-Желева при исследовании некоторых рассеивов эстонских горючих сланцев. Труды ТПИ, серия А, № 226, 1965.
3. Л.М. Ииспуу. О процессе размола сланцев в молотковых мельницах. Печатано в наст. сборнике.
4. Н.А. Сигуревский. Седиментометрический анализ М.-Л. Изд. АН СССР, 1948.

УДК 541.182.3.001.5

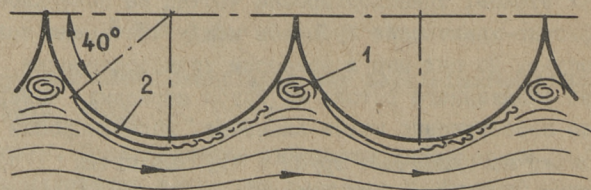
Х.А. Роорайд, И.П.Элик

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ
ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА НА ОСАЖДЕНИЕ
ЧАСТИЦ ПЫЛИ НА ТРУБЫ В ШИРМЕ

Ширмовые поверхности нагрева нашли широкое применение в котлах большой производительности. Ширмовая поверхность характеризуется коридорным расположением труб с малым продольным шагом ($s_2/d = 1 - 1,2$) и большим поперечным шагом ($s_1 = 400 - 1500$ мм). Существенное различие ширмовых поверхностей нагрева от обычных конвективных трубных пучков выдвигает ряд вопросов, связанных с их загрязнением летучей золой. В общих чертах процесс загрязнения состоит из двух этапов: транспортировка частиц на поверхность трубы и физико-химические процессы между частицами золы и поверхностью. До сих пор к вопросам транспортировки частиц пыли из запыленного потока на трубы ширмовых поверхностей уделено незаслуженно малое внимание. Если вопросам осаждения частиц на одиночные трубы и трубные пучки посвящено ряд работ [1,2,3], то по вопросам осаждения частиц на ширмовые трубы их почти нет. Тем не менее, знание факторов, влияющих на транспорт частиц из потока на ширмовые трубы позволяет в большей или меньшей степени управлять процессом загрязнения при помощи режимных и конструктивных мер. В рамках данной статьи сделана попытка охарактеризовать влияние основных параметров запыленного потока и геометри-

ческих характеристик ширмы на процесс осаждения частиц на ширмовые трубы.

При изучении процесса осаждения возникает вопрос чисто аэродинамического характера: какова картина обтекания ширмы турбулентным потоком? По существующим данным можно представить следующую картину обтекания. Обтекание лобовой части первой трубы соответствует обтеканию одиночной трубы. Образованию развитой вихревой зоны за первой трубой препятствует вторая труба ширмы. По [4,6] первая и вторая трубы ширмы создают искусственную турбулентность потока в зоне последующих труб, которая не зависит от начальной турбулентности набегающего потока. Начиная с третьей трубы ширмы картина обтекания стабилизируется и остается подобной для остальных труб ширмы, кроме последней трубы. Некоторые количественные изменения, связанные с формированием картины обтекания, продолжают и после третьей трубы. Полную стабилизацию этой картины можно ожидать в области X-XV трубы [6]. Визуальные наблюдения указывают на существование стоячих вихрей между соседними трубами ширмы (см. фиг. 1) [5]. Наличие таких вихрей подтверждается и опытами по теплообмену [4]. Измерение локальных давлений на поверхности



Фиг. 1. Картина обтекания задних труб ширмы по [4, 5, 6].
1 - стоячий вихрь, 2 - пограничный слой.

труб в ширме указывает на возможность образования пограничного слоя начиная с угла $\sim 40^\circ$ от лобовой образующей трубы (фиг. 1) [6]. Условия для отрыва пограничного слоя возникают у боковой образующей трубы. Существование пограничного слоя на поверхности трубы в указанных пределах эк-

спериментально не доказано. За последней трубой ширины образуется вихревая зона подобно вихревой зоне за одиночной трубой. Исследования подтверждают стабильность такой картины обтекания в интервале Re_d от 1000 до 60000. Если рассматривать ширму как шероховатую поверхность, то можно предполагать, что в зоне, вблизи ширмы, образуется некоторый пристенный слой, соответствующий подслою при обтекании гладкой поверхности [7]. В этом слое происходит затухание вихрей, которые проникают туда из центральной части потока между ширмами. Толщина пристенного слоя, по тем же данным, имеет одинаковый с размером элементов шероховатости порядок величин, т.е. для ширмы должен иметь величину порядка половины диаметра трубы. Однако существование пристенного слоя в ширмах экспериментально не доказано. Также нет данных о распределении скоростей потока между двумя соседними ширмами, хотя можно предполагать, что течение между ширмами аналогично течению в плоском канале.

Несмотря на существование относительно стабильной картины обтекания, авторы, исследовавшие обтекание трубных пучков и в том числе ширм, утверждают, что аналитическое описание картины течения затруднительно в связи с трудностями в определении распределения скоростей вблизи поверхности труб [4,6].

При обтекании ширмовых поверхностей запыленным потоком вышеизложенная картина течения позволяет дать только качественную картину осаждения частиц на ширмовые трубы. В общих чертах такая картина дана в [8]. Инерционное осаждение частиц на лобовой части первой трубы ширмы соответствует осаждению на одиночные трубы. Этот процесс исследован рядом авторов и имеются данные, позволяющие с необходимой степенью точности определить вероятность ударов частиц о первую трубу ширмы в зависимости от инерционных параметров частиц [2,3]. Частицы, проносимые потоком мимо первой трубы, благодаря огибанию линий потока, удаляются от ширмы. Таким образом в начальной части ширмы образуется зона, в которой попадание частиц на трубы маловероятно. Пройдя не-

который путь, частицы снова приближаются к ширме вследствие турбулентных пульсаций потока и начинают двигаться параллельно ширме. При этом частицы с меньшей инерцией приближаются к ширме на меньшем расстоянии от первой трубы, чем частицы с большей инерцией. Осаждение частиц в нестабилизированной части их траекторий является сложным процессом и в настоящей статье не рассматривается.

На стабилизированном участке движения частиц можно предполагать следующую схему осаждения. Частицы, попавшие достаточно близко к ширме, получают вследствие турбулентных пульсаций потока некоторый компонент скорости в направлении к ширме, инерцией пробивают пристенный слой и ударяются о трубу. Учитывая, что пульсационные скорости не менее чем на один порядок меньше поступательной скорости частицы, удары частиц о трубу должны происходить под острым углом к оси ширмы на обращенной против потока стороне трубы. Действительно, опытами установлено, что удары происходят под углом от 0° до 6° [8]. Если длина свободного пробега частицы недостаточна для достижения поверхности трубы, то она уносится потоком мимо трубы и может при благоприятных условиях осажаться на следующей трубе и т.д. При этом условия для всех труб являются одинаковыми и вероятность попадания частиц на трубы не должна зависеть от порядкового номера трубы. Изменением концентрации частиц в пристенной области можно пренебречь, так как убывание концентрации за счет осаждения восстанавливается частицами из центральной части потока. Хотя описанная картина осаждения частиц не позволяет теоретически определить зависимость ударов частиц о трубу от параметров частиц и потока, можно предполагать, что осаждение происходит главным образом за счет инерционных сил и не рассматривать осаждения за счет диффузии частиц к поверхности. Против диффузионного осаждения говорит и тот факт, что при опытах, описанных в [8], ни в одном случае не наблюдалось осаждение на задней стороне последней трубы ширмы.

С целью выяснить закономерности осаждения частиц на трубы ширмы проводились опыты на холодной модели ширмы при диаметре труб $d = 6,0; 8,2$ и $12,3$ мм. Модель ширмы была размещена вдоль оси аэродинамического канала с шириной $l = 300$ мм. При этом, в соответствии с диаметрами труб, относительные диаметры труб в ширме были $d/l = 0,0200; 0,0274$ и $0,0410$. В качестве пыли при опытах применялся порошок АКР-7 из шаровидных частиц с диаметрами от 7 до 35 мкм. Скорость потока изменяли в пределах от 2,5 до 12,3 м/сек. Для удерживания осаждающихся частиц, трубы были покрыты слоем вазелина. Методика проведения опытов изложена в [8]. В опытах было определено число осевших частиц на всех трубах модели ширмы при данном скоростном режиме. При подсчете производилось измерение диаметра частиц и получены данные об осаждении частиц со средними диаметрами 10,6 мкм (от 7,05 до 14,1 мкм); 17,6 мкм (от 14,1 до 21,15 мкм); 24,7 мкм (от 21,15 до 28,2 мкм) и 31,7 мкм (от 28,2 до 35,25 мкм).

Параметром, характеризующим процесс осаждения частиц, выбрана вероятность удара частиц о n -ую трубу ширмы η_n . При этом η_n определялась как

$$\eta_n = N_n / N_0, \quad (1)$$

где N_0 - число частиц в потоке до ширмы, проходящее через проекцию первой трубы;

N_n - число частиц, осевших на n -ой трубе ширмы;

n - порядковый номер трубы в ширме.

N_0 получено на основе количества осажденных на первой трубе частиц:

$$N_0 = N_1 / \eta_1, \quad (2)$$

где η_1 - вероятность удара частиц о первую трубу ширмы.

Последняя определялась по условиям обтекания модели по данным [2].

Полученные данные об изменении η_n в зависимости от порядкового номера трубы действительно показывают, что значения имеют тенденцию к стабилизации, как можно предполагать

по вышеуказанной схеме осаждения. В начальном, нестабилизированном участке кривой значения η_n увеличиваются с возрастанием номера трубы. При этом кривая имеет довольно сложный характер с точкой перегиба, как описано в [8]. В дальнейшем сделана попытка найти количественные зависимости вероятностей ударов от параметров частицы и потока на стабилизированном участке ширмы. Знание этих зависимостей в последующем, вероятно, позволит подробнее проанализировать явления, происходящие в начальной части ширмы.

Для охарактеризования осаждения частиц на стабилизированном участке ширмы вводится понятие вероятности удара частиц о трубу на бесконечном расстоянии от первой трубы ширмы η_∞ . Определение значений η_∞ непосредственно по опытным данным возможно для частиц со средним диаметром 10,6 мкм, а также при скоростях потока от 2,5 до 6,4 м/сек для частиц с диаметром 17,6 мкм. В остальных случаях стабилизация значений η_n происходит за пределами ширмы и определение η_∞ требовало бы применения при опытах ширмы с большим числом труб, что существенно увеличивает трудоемкость подсчета осевших частиц. Для определения η_∞ у частиц со средними диаметрами 24,7 и 31,7 и частично при диаметре 17,6 мкм, значения η_n были аппроксимированы при помощи формулы:

$$\eta_n = \eta_\infty \exp[-a \exp(-bn)] \quad (3)$$

где a и b константы при данных условиях обтекания ширмы. При определении η_∞ , a и b поступали следующим образом. η_∞ давали несколько значений и a и b определялись по опытным данным методом наименьших квадратов. Наилучшее значение η_∞ определялось из условия, чтобы сумма квадратов отклонений опытных η_n от значений вычисленных по (3) оказалась наименьшей. Полученные таким образом значения η_∞ приведены в таблице I.

В общем случае процесс движения запыленного потока и осаждение частиц можно охарактеризовать следующими безраз-

мерными критериями подобия [9]:

$$Re_d = wd/\nu; Fr = w^2/gd; Stk = \delta^2 w \rho / 18 \nu d \rho_2; No = w\tau/d; \rho/\rho_2$$

и с, (4)

- где w - скорость потока,
 ν - кинематическая вязкость потока,
 ρ_2 - плотность потока,
 δ - диаметр частицы,
 ρ - плотность частицы,
 d - диаметр трубы,
 g - ускорение тяжести,
 τ - время,
 c - концентрация частиц.

Т а б л и ц а I

Вероятность удара частиц о трубу на стабилизированном участке ширмы, $10^4 \cdot \eta_\infty$

Диаметр трубы, мм	Относит. диаметр трубы	Скорость потока, м/сек	Средний диаметр частиц, мкм			
			10,6	17,6	24,7	31,7
6,0	0,0200	2,5	4,1	9,0	20,5	25,7
		4,8	9,6	21,5	29,2	45,7
		6,4	11,6	25,2	36,1	41,2
		11,9	16,0	33,8	54,3	57,8
8,2	0,0274	6,4	11,0	27,2	40,5	60,7
		4,8	7,5	22,5	44,1	55,0
		6,4	9,5	33,0	46,5	64,0
12,3	0,0410	7,7	11,3	37,0	55,1	69,1
		12,3	17,1	47,5	71,2	86,0

Для стационарного процесса критерий гомохронности No выпадает. При опытах отношение стационарной скорости оседания под действием силы тяжести к скорости потока было меньше 0,015 и поэтому влиянием гравитационных сил можно пренебречь, вследствие чего выпадает из системы и критерий Фруда Fr . Концентрация частиц не влияет на картину потока, ес-

ли $c < 0,05 - 0,1$ кг/кг [10]. В данном случае это условие выполняется и влиянием концентрации пренебрегают.

В качестве безразмерной геометрической характеристики ширмы при рассмотрении вопроса осаждения частиц на стабилизированном участке ширмы может быть принят относительный диаметр трубы $d/2s_1$, где s_1 - поперечный шаг ширмы. Этот параметр соответствует относительной шероховатости при течении в шероховатых каналах Δ/D , где Δ - размер элементов шероховатости и D - гидравлический диаметр канала. В данном случае относительный диаметр трубы равен d/l где l - ширина аэродинамического канала.

Таким образом осаждение частиц на стабилизированном участке ширмы должно описываться критериальным уравнением:

$$\eta_{\infty} = f(\text{Re}_d, \text{Stk}, \varphi/\varphi_e, d/l). \quad (5)$$

В данном случае φ/φ_e является постоянным для всех опытов и выпадает из уравнения (5). Кроме того, нужно отметить, что изменение d/l производилось только изменением диаметра трубы при постоянной ширине канала. Вопросы о влиянии плотности частицы и поперечного шага ширмы требуют дальнейших исследований.

Описание вероятности удара частиц о трубу степенной зависимостью

$$\eta_{\infty} = C \text{Re}_d^n \text{Stk}^r (d/l)^t \quad (6)$$

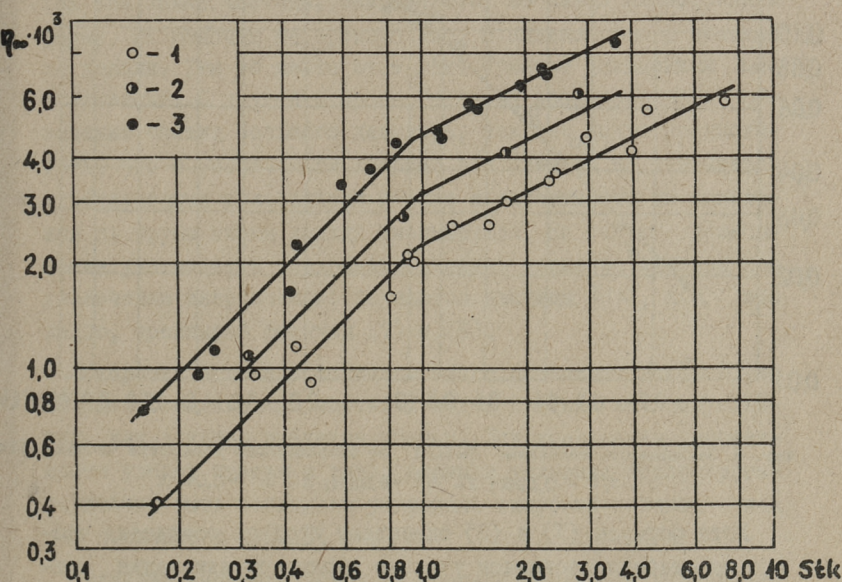
не дало удовлетворительных результатов вследствие разброса точек.

При изображении на фиг. 2 значений η_{∞} в зависимости только от инерционного параметра частицы Stk , оказывается, что значения η_{∞} при каждом относительном диаметре трубы ширмы укладываются на одну кривую и зависимости имеют одинаковый характер. Привести критериальное уравнение (5) к расчетному виду удалось заменив кривые двумя отрезками прямых, одним при $\text{Stk} < 1$ и другим при $\text{Stk} > 1$. Обработ-

ка опытных данных методом наименьших квадратов дала при $Stk < I$

$$\eta_{\infty} = 0,117 \left(\frac{d}{l}\right) Stk \quad (7)$$

с вероятной ошибкой $\pm 8,4\%$. Эта зависимость верна для следующих условий: $0,17 < Stk < I$; $0,02 < d/l < 0,04$; $1000 < Re_d < 10000$; $\rho/\rho_2 = 990$.



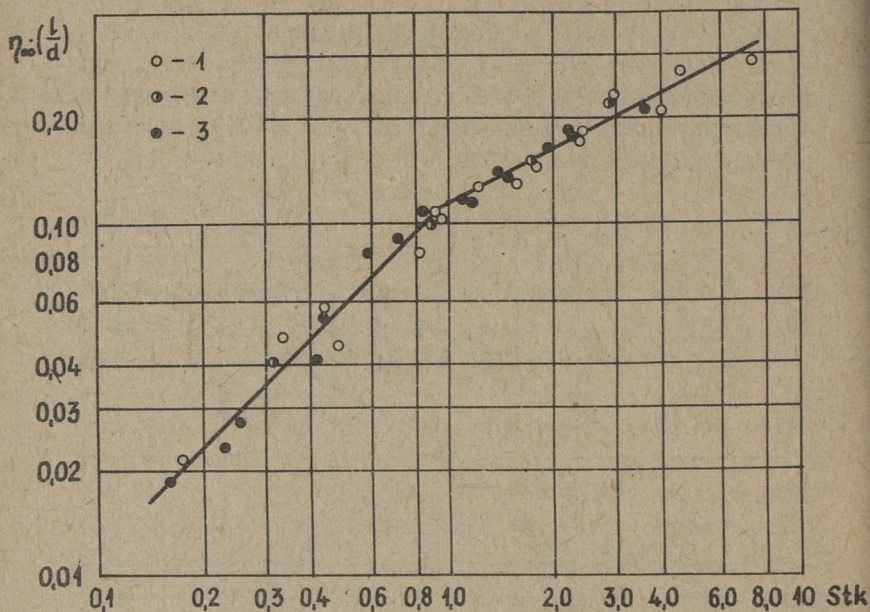
Фиг. 2. Зависимость величины η_{∞} от инерционного параметра частицы Stk
 1- $d/l = 0,0200$; 2- $d/l = 0,0274$; 3- $d/l = 0,0410$

При $I < Stk < 7,4$

$$\eta_{\infty} = 0,114 \left(\frac{d}{l}\right) Stk^{0,52} \quad (8)$$

с вероятной ошибкой $\pm 4,5\%$. Остальные условия остаются такими же как для формулы (7). Результаты обработки изобраа-

жены на фиг. 3.



Фиг. 3. Зависимость величины $\eta_{\infty}(l/d)$ от инерционного параметра частиц Stk
 1 - $d/l = 0,0200$; 2 - $d/l = 0,0274$; 3 - $d/l = 0,0410$.

Хотя формулы (7) и (8) описывают процесс осаждения частиц на стабилизированном участке ширмы при изменении отдельных параметров в относительно узких пределах они позволяют получить некоторое представление о влиянии основных факторов, Как видно, существенное влияние на осаждение имеет диаметр частицы. При этом влияние диаметра частицы на осаждение на стабилизированном участке ширмы гораздо меньше, чем при осаждении на первой трубе. По [2] для первой трубы показатель степени диаметра частицы 4,7. Можно предполагать, что существует некоторый минимальный диаметр частиц при котором длина свободного пробега частицы оказывается настолько короткой, что частицы уносятся потоком и не могут осадаться по инерционному механизму. Для одиночной

трубы существование такого критического диаметра доказано [I]. На возможность существования такого нижнего предела при осаждении частиц на задние трубы ширмы указывает следующий, обнаруженный при опытах факт. При определении численного распределения пыли до ввода его в канал под микроскопом можно было видеть множество мелких частиц, размером ниже 5 мкм. После осаждения на трубы в ширме оказалось, что частицы, размером ниже ~ 4 мкм, отсутствуют. Так как такие частицы, как правило, не имели шарообразную форму, их подсчет не производился и анализа этого явления не делали. Тем не менее этот факт требует дальнейших исследований. С другой стороны, требует исследования и поведение частиц большого диаметра, так как можно предполагать, что с увеличением инерции эти частицы не увлекаются турбулентными пульсациями потока и вероятность их попадания на трубы ширмы должна уменьшаться. На такую возможность указывает и уменьшение влияния диаметра частицы при увеличении инерционного параметра частицы St_k , как это видно, сравнивая формулы (7) и (8).

Скорость потока в конечном итоге оказывает влияние на инерцию осаждающихся частиц и ведет к таким же результатам, как влияние диаметра частиц. Для уменьшения вероятности ударов частиц о трубу ширмы в условиях котлоагрегата должны быть соблюдены умеренные скорости потока, как это показано и в [II].

Влияние диаметра трубы на процесс осаждения усиливается с увеличением инерции частицы. При данной обработке значений η_∞ диаметр трубы в формуле (7) сокращается, т.е. при $St_k \ll 1$ влиянием диаметра трубы можно пренебречь. В области $St_k > 1$, как показывает формула (8), η_∞ зависит от диаметра трубы примерно в степени 0,5.

Сильное влияние на процесс осаждения оказывает поперечный шаг ширмы s_1 . Можно предполагать влияние поперечного шага ширмы на скоростное и концентрационное поле между ширмами, но даже этим трудно объяснить такую зависимость η_∞ от s_1 . Этот факт требует дальнейшего кон-

троля, так как при данных опытах ширина канала была постоянной и изменение относительного диаметра трубы ширмы производили только изменением диаметра трубы ширмы.

В заключение следует подчеркнуть необходимость совместных исследований вопросов течения и осаждения на ширмовых поверхностях.

Л и т е р а т у р а

1. Н.А. Фукс. Механика аэрозолей. М., Изд. АН СССР, 1955.
2. В.И. Игнатъев, И.И. Зверев. "Теплоэнергетика", 1961, № 3.
3. И.П. Мазин. Труды ЦАО, 1955, № 7.
4. С.Е. Jones, E.S. Monroe. Transactions of the ASME, vol. 80, 1958, nr.1
5. E.A. Hauser, D.R. Dewei. Journ. of Physical Chemistry. vol. 46, 1942.
6. S.Siennicki, Prace Instytutu Techniki ciepluy. 1964, nr. 24.
7. Л.А. Тепакс. Труды ТПИ, серия А, № 78, 1956.
8. Х.А. Роорайд. Труды ТПИ, серия А, № 226, 1965.
9. П.М. Волков. Моделирование запыленных потоков. В сб. "Теория подобия и моделирования". М., Изд. АН СССР, 1951.
10. И.И. Зверев. "Теплоэнергетика", 1957, № 7.
11. И.П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата, Таллин, Эстгосиздат, 1961.

УДК 669.15:621.182.15.001.5

Х.И. Таллермо

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КОРРОЗИЯ СТАЛИ I2XIMФ
В УСЛОВИЯХ ВИБРОЧИСТКИ1. Введение

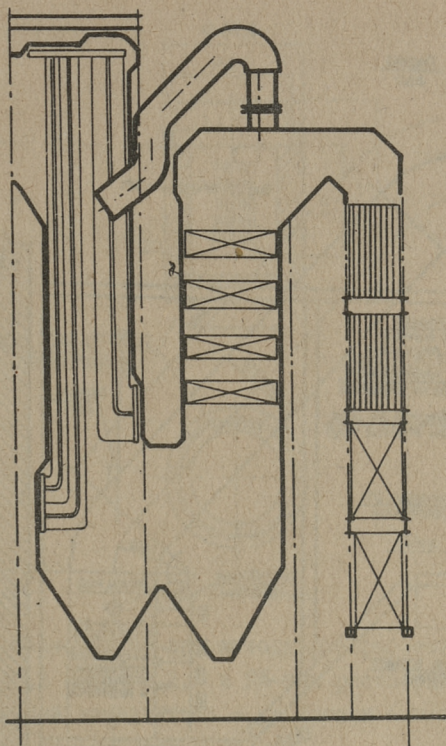
Недавно в ВТИ разработан вибрационный метод для чистки пароперегревателей сланцевых котлов типа ТП-17, ТП-67, а также БКЗ [1, 2, 3]. Сущность этого метода состоит в том, что в результате колебаний очищаемых труб на их поверхности и в слое золы создаются силы инерции, которые отрывают отложения с труб. При отделении отложений с труб вместе с черным поверхностным слоем, скорость коррозии металла увеличивается, т.к. происходит удаление защитной оксидной пленки, обнажая при этом чистую металлическую поверхность трубы [4]. В конечном результате циклическое удаление оксида ведет к утонению стенок труб и преждевременному их разрушению.

Как показывают лабораторные исследования в НИ лаборатории промышленной теплоэнергетики [5], скорость коррозии котельных сталей 20, I2XIMФ, I5XM, ЭИ-756 и IXI8H9T в атмосфере воздуха в присутствии сланцевой золы, так же и в атмосфере дымовых газов в присутствии сланцевой золы выше, чем в чистой среде воздуха. В эксплуатационных условиях на трубах пароперегревателей со временем образуются золотые отложения, которые имеют многослойную структуру, нижние слои которых богаты коррозионно-активными компонентами (Na

K, Cl, SO₂). При работе виброустановок действуют силы инерции, а также термические напряжения при остановках и пусках котла. Для получения данных о скорости коррозии стали I2XIMФ в вышеуказанных условиях, были проведены опыты на газовом шунте котла № 2 Прибалтийской ГРЭС при 2-х частотах - 13 и 47 герц - и с разными амплитудами вибрации. Параллельно с вибрируемыми трубами в испытательную камеру шунта вставлялись трубы, не подверженные вибрации, для получения сравнительных данных о влиянии вибрации на скорость коррозии. Исследование коррозии выполнено при длительных опытах до 520 часов и при температуре дымовых газов до 800°С.

2. Методика проведения опытов

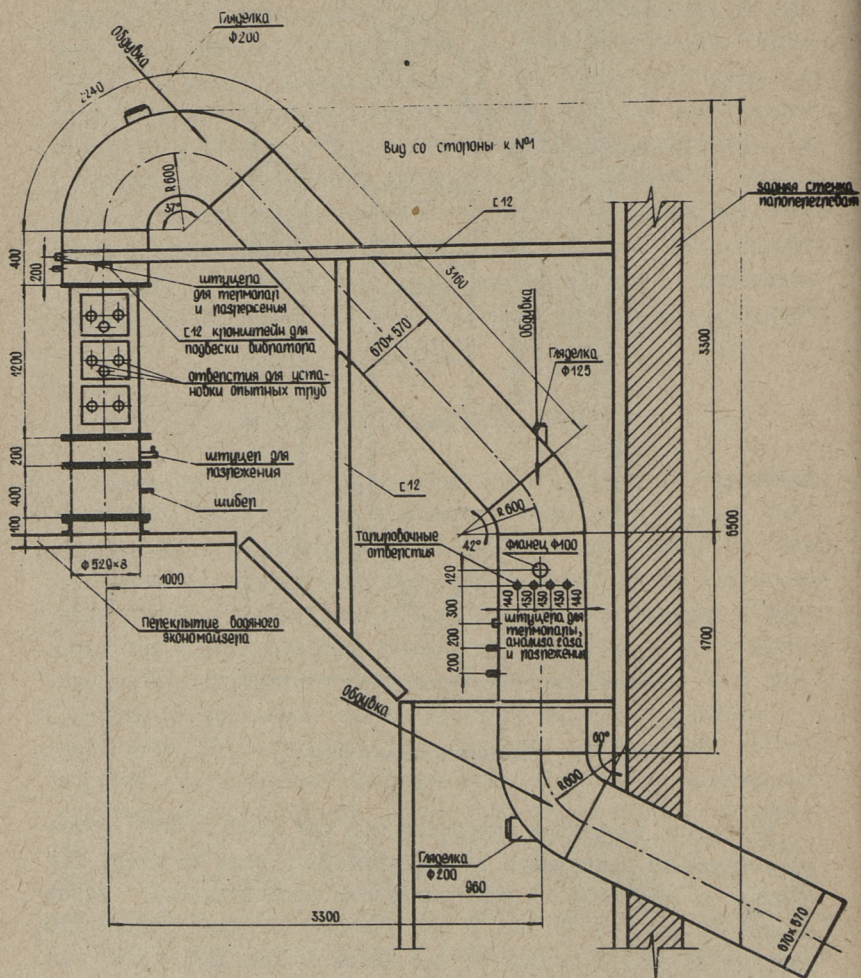
Опыты проводились на газовом шунте котла № 2 Прибалтийской ГРЭС (фиг. 1 и 2). В испытательную камеру было установлено в горизонтальном положении от 6 до 8 опытных труб с образцами, вес которых был раньше определен на аналитических весах с точностью 0,001 г. Образцы соединялись с трубами при помощи резьбы. Опытные трубы охлаждались внутри воздухом от дутьевого вентилятора котла. Образцы были изготовлены из дренажной трубы ширмового пароперегревателя диаметром 32/19 мм (фиг. 3). Заданная температура металла образца выдерживалась автоматически при помощи электронных регуляторов типа ЭРТ-59. Всего было установлено 4 регулятора из расчета 1 регулятор на 2 трубы. Температура металла образцов измерялась ХА термопарами диаметром 0,5 мм, приваренными ко дну отверстий контактной сваркой. В одной из спаренных труб установлено 2 термопары: первая термопара для регулятора температуры, а вторая - для записи температуры на ленточную диаграмму автоматического электронного потенциометра типа ЭПП-09. В другой трубе - только одна термопара для записи температуры.



Фиг. 1. Установка опытного шунта

Включение вибратора мощностью 0,8 квт 2800 об/мин автоматическое от командного электроприбора и реле времени. При опытах с частотой 13 герц включение производилось через каждые 40 мин. на 20 сек, а при частоте 47 герц - через 120 мин. на 10 сек. В первом случае вибратор был закреплен на свободных концах консольно закрепленных труб и работал в резонансовом режиме, а во втором случае вибрация передавалась с обоих концов жестко закрепленных труб.

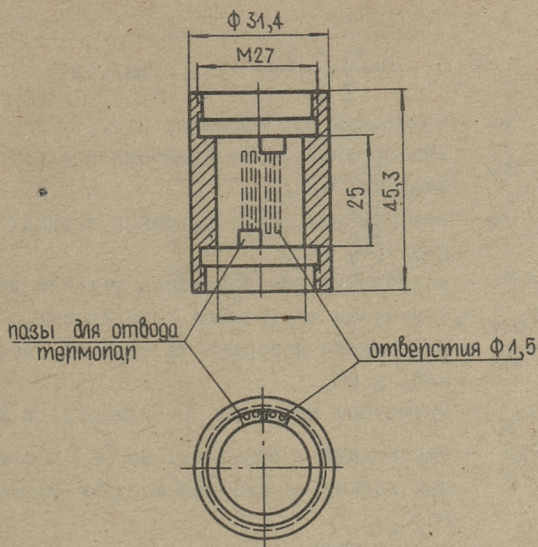
По окончании опыта образцы отвинчивались от труб и визуально фиксировалось состояние внутренней оксидной пленки,



Фиг. 2. Опытный шунт

т.е. определялась доля поверхности, где оксидная пленка разрушалась, для введения поправки.

Снятие пленок продуктов коррозии с образцов проводилось



Фиг. 3. Образец

в комнатной температуре при катодной обработке с плотностью тока 0,15 и 0,2 а/см² в 2,5 и 5%-ных растворах серной кислоты, содержащей замедлитель - уротропин 6 г/л.

Определение веса образцов производилось 2 раза: первый раз после удаления продуктов коррозии снаружи, второй раз - изнутри. Параллельно проводилась обработка контрольных образцов для определения поправки на растворение металла.

Потеря металла рассчитана по выражениям:
со стороны воздуха

$$K_{\text{возг.}} = \frac{0,723 (G_1 - G_2) \frac{F}{F_{\text{окс.}}} - \Delta M_1}{F_{\text{возг.}}};$$

со стороны дымовых газов

$$K_{\text{г.г.}} = \frac{(G_0 - G_2) - [0,723 (G_1 - G_2) \frac{F}{F_{\text{окс.}}} - \Delta M_1]}{F_{\text{г.г.}}}$$

Глубинный показатель коррозии со стороны газов

$$\Pi = \frac{8,76 \cdot \text{Кгг}}{\gamma \cdot \tau} \quad \text{мм/год.}$$

- Здесь G_0 - начальный вес образца, в г,
 G_1 - вес образца после удаления продуктов коррозии снаружи, в г,
 G_2 - вес образца после удаления продуктов коррозии изнутри, в г,
 ΔM_1 - количество растворенного металла изнутри, в г,
 $F_{\text{вн.ог.}}$ - суммарная внутренняя поверхность, в м^2 ,
 $F_{\text{окс.}}$ - внутренняя поверхность покрыта оксидной пленкой, в м^2 ,
 $F_{\text{нар.}}$ - суммарная наружная поверхность, в м^2 ,
0,723 - переводный коэффициент по [6] (состав оксидных пленок со стороны воздуха соответствует Fe_3O_4),
 τ - продолжительность опыта, в часах,
 γ - удельный вес стали I2XIMФ, г/см² (7,8).

Суммарная внутренняя поверхность образца составляет в среднем 49,14 см², в наружная поверхность - 54,40 см² (включая торцовые поверхности).

При определении средней арифметической температуры по ленточной диаграмме исходили из следующего:

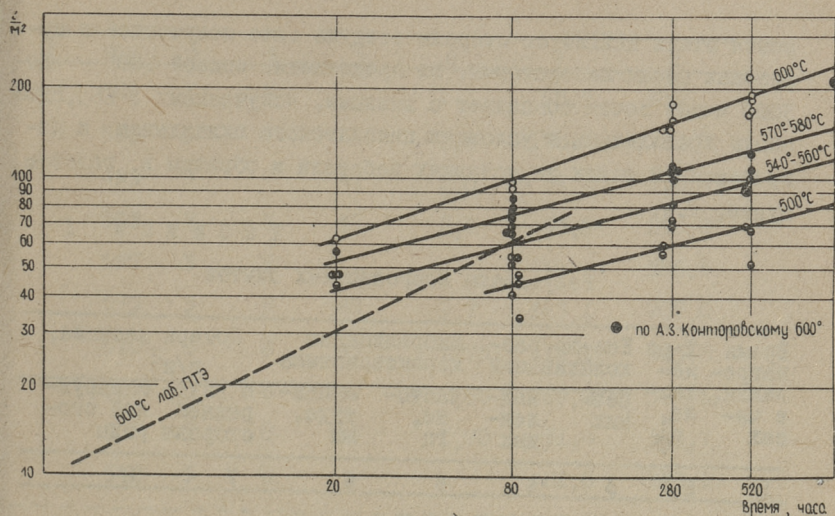
1. При пусках и остановках учет времени опыта велся начиная с температуры металла 400°.

2. Поправку на перепад температуры металла вдоль образца и по окружности не вводили, т.к. перепад составляет не больше 2° по длине и 4-6° по окружности.

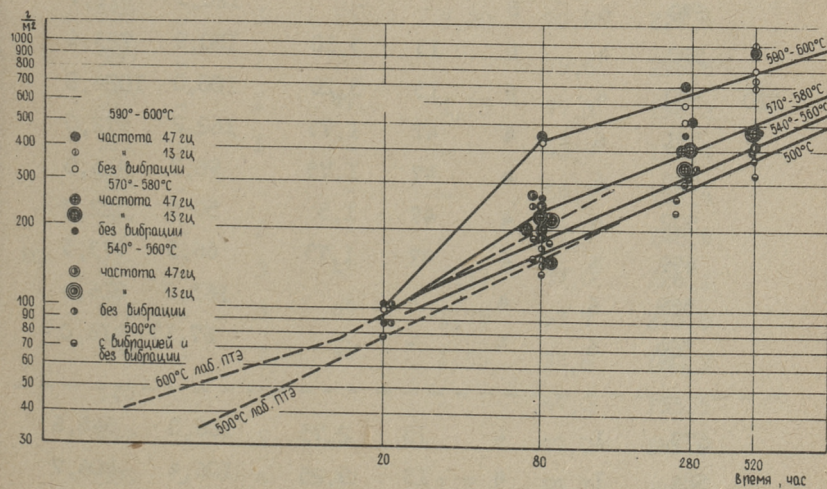
Скорость дымовых газов, которая во время опыта не регулировалась, составляла ~ 6 м/сек.

3. Результаты опытов

На фиг. 4 и 5 и в таблицах I и 2 приведены результаты коррозионных опытов со стороны воздуха и дымовых газов. Кор-



Фиг. 4. Коррозия стали 12X1MФ со стороны воздуха



Фиг. 5. Коррозия стали 12X1MФ со стороны газов

розия стали I2XIMФ со стороны воздуха выше полученной в муфельных печах лаборатории, но продолжение кривой 600⁰ до 3000 часов почти совпадает с данными, полученными в [6], где опыты проводились в условиях циклического охлаждения и нагревания. В таких же условиях работали и образцы в газовом шунте, т.е.

Т а б л и ц а I

Результаты коррозионных опытов

Время нагревания, в часах	Т-ра металла, °С	Кол-во расхождений		Вибрационная характеристика		Потеря металла, г/м ²	
		рез-ких	мед-ленных	частота, гц	амплитуда, мм	с внутренней стороны	с наружной стороны
I	2	3	4	5	6	7	8
	604	6	8	13	3,75	217,1	699,1
	573	6	8	13	3,50	106,2	477,7
	570	6	8	-	-	120,3	471,7
	590	4	6	13	3,10	180,9	723,6
520	600	4	6	13	3,20	188,0	1024,8
	591	6	4	47	1,73	162,2	972,0
	545	6	4	47	1,75	98,3	416,5
	502	6	4	47	1,5	50,5	322,0
	499	6	4	47	1,73	66,5	373,5
	589	6	4	-	-	163,2	816,4
	504	6	4	-	-	67,15	416,0

	577	I	4	13	2,75	106,0	348,6
	584	I	4	13	3,25	106,4	406,7
	592	I	4	-	-	157,3	517,5

I	2	3	4	5	6	7	8
280	584	I	4	-	-	98,7	460
	590	3	7	47	I,5	I78,9	520,0
	493	3	7	47	2,0	59,8	238,4
	503	3	7	47	2,0	55,5	258,8
	597	3	7	-	-	I44	596,4
	593	5	8	47	I,7	I43,I	707,0
	570	5	8	47	I,75	II2,I	405,8
	50I	5	8	47	I,60	69,2	324,6
	505	5	8	47	I,70	7I,4	30I,7
	542	5	8	-	-	8I,0	343,I

	582	-	I	I3	3,0	65,I	222,9
	546	-	I	I3	2,70	5I,3	I45,8
	558	-	I	I3	3,20	70,8	2I7,5
	580	-	I	-	-	79,6	2I6,4
	570	-	I	47	I,75	77,5	I96,2
	5II	-	I	-	-	40,9	I37,4
	562	-	I	-	-	54,7	I69,4
	56I	-	I	-	-	67,4	248,9
80	540	-	3	47	I,77	57,0	226,I
	54I	-	3	47	I,75	63,7	275,8
	498	-	3	47	I,55	33,6	I80,3
	5I0	-	3	-	-	44,0	I55,5
	492	-	3	-	-	47,0	I85,0
	585	-	4	47	I,7	85,I	248,3
	603	-	4	47	I,65	96,9	450,0

I	2	3	4	5	6	7	8
	550	-	4	-	-	54,1	150,0
	579	-	4	-	-	73,1	259,3
	610	-	4	-	-	91,2	444,7

	584	-	I	-	-	64,3	103,4
	590	-	I	-	-	62,3	97,2
20	509	-	I	-	-	44,8	77,2
	570	-	I	-	-	56,0	87,3
	555	-	I	-	-	47,6	88,2
	552	-	I	-	-	47,8	103,0

резкие охлаждения через каждые 3-4 дня для чистки шунта от осевшей золы и непрерывное колебание температуры металла до $\pm 10 - 12^{\circ}$ за счет колебания температуры дымовых газов до $50 - 60^{\circ}$ и более. Со стороны воздуха растрескивания и отслаивания оксидных пленок не наблюдалось. Пленка была монолитная и прочно связана с металлом. Структурных исследований оксидных пленок не проведено. Со стороны дымовых газов кривая 500° почти совпадает с данными лаборатории, но кривая 600° несколько выше лабораторной кривой.

Большой разброс опытных точек может быть вызван:

1) неравномерным увеличением со временем концентрации коррозионно-активных соединений на отдельные трубы на границе фаз (металл - золотое отложение);

2) режимными факторами работы топки;

3) более активным действием свежих частичек летучей золы на металл;

4. влиянием колебания температуры на свойства оксидного слоя.

Как видно из кривых, вибрационная очистка при частотах 13 и 47 герц не ускоряет коррозионного процесса, так как нет существенной разницы между точками, полученными в условиях вибрации и без нее. Отсюда вытекает, что в условиях виброочистки золотые отложения с труб не удаляются вместе с защитной оксидной пленкой. Как показали визуальные наблюдения за опытными трубами во время работы вибратора, из отложения удаляется только его верхняя часть — гребень, и со временем толщина неудаляемой части отложения растет, достигая при 500 часовой выдержке 20 — 30 мм. Высказанное, очевидно, и является одной из причин неудовлетворительной работы виброустановок на котлах ТП-17. В данное время пароперегреватели котлов ТП-17 и ТП-67 снова обдуваются обдувочными аппаратами ОПК-9, а виброустановками пользуются только в крайних случаях. Это связано с появлением усталостных разрушений в трубах от виброочистки. Как показывают опыты, силы сцепления оксидной пленки с металлом зависят от температуры металла. Иначе нельзя объяснить тот факт, что во время опыта развиваемое вибратором ускорение от 2 до 8 g является недостаточным для отрыва отложений и оксидной пленки, но в холодном состоянии часто отложения вместе с оксидом отпадали при таких же ускорениях. Осмотром установлено, что у образцов, работавших с температурой 560° и выше, оксидная пленка под золотыми отложениями прочно связана с металлом. Она состоит из отдельных слоев, между которыми часто наблюдалось белое вещество.

В таблице 2 приведены усредненные данные скорости коррозии стали 12Х1МФ в зависимости от температуры и продолжительности опытов в единицах мм/год.

Как видно из таблицы 2, скорость коррозии зависит от циклического разрушения оксидной пленки на трубе. Чем дольше оксидная пленка держится, тем медленнее идет коррозия.

Т а б л и ц а 2

Скорости окалинообразования стали I2XIMФ в среде продуктов сгорания эстонских сланцев в мм/год

Температура металла, °С	Время выдержки окалины в часах			
	80	280	520	1000
500	2,2	1,1	0,8	0,55
540-560	2,5	1,3	0,9	0,6
570-580	3,3	1,6	1,1	0,75
590-600	6,1	2,6	1,7	1,1

Отсюда вытекает, что очистку высокотемпературных поверхностей нагрева необходимо организовать, таким образом, чтобы слой окалины не разрушался. В первую очередь это относится к паровой обдувке. Режим обдувки (динамический напор струй, частота и продолжительность обдувки) должен выбираться исходя из минимальных скоростей коррозии металла поверхностей нагрева.

Скорость коррозии стали I2XIMФ в среде продуктов сгорания эстонских сланцев за 1000 часов 10 раз выше, чем по характеристикам окалинстойкости, принятым совещанием энергомашиностроителей в 1958 г. в Ленинграде (при 600°С 0,12 мм/год). Исходя из этого, принятая на совещании окалинстойкость стали I2XIMФ не применима в условиях сжигания сланцев в котлоагрегатах высокого давления.

Л и т е р а т у р а

1. Л.И. Кропп и др. "Теплоэнергетика", 1963, №10.
2. Л.И. Кропп и др. "Теплоэнергетика", 1963, №11.
3. Л.И. Кропп. "Электрические станции", 1963, №10.
4. И.П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Таллин, Эст. гос.изд., 1961.

5. И.П. Эпик, Э.Л. Томанн, Х.Х. Арро. Исследование газовой коррозии сталей в присутствии золы сланцев и углей Канско-Ачинского бассейна. Отчет ТПИ, 1964.

6. А.З. Конторовский и др. "Теплоэнергетика", 1964, № 2.

С о д е р ж а н и е

	Стр.
1. И.Р. Микк. систематизированные данные о геометрическо-оптических характеристиках трубных пучков.....	3
2. Л.М. Ыйспуу. О процессе размола сланцев в молотковых мельницах.....	35
3. Н.С. Розанов, Г.А. Соо, Л.М.Ыйспуу. Об исследовании мелкой части пыли сланцев..	53
4. Х.А. Роорайд, И.П. Эпик. Исследование влияния основных факторов запыленного потока на осаждение частиц пыли на трубы в ширме.....	65
5. Х.И. Таллермо. Высокотемпературная коррозия стали I2XIMФ в условиях виброочистки	77



ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА
СБОРНИК СТАТЕЙ

У

Таллинский политехнический институт

Редактор В.Валликиви

Технический редактор Л. Лоопер

Подписано к печати 22.П.1966. Бумага 60x90,
1/16. Печ.л. 5,75. Уч.изд.л. 4,1. Тираж 500.
МВ-02196, Заказ №73
Ротапринт ТПИ, Таллин, Пякк ялг 14
цена 28 коп.

1010 26 коп.