

7р. 6. /
698

ISSN 0136-3549
0320-3360

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI

TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИННСКОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

TRANSACTIONS OF TALLINN
TECHNICAL UNIVERSITY

ИССЛЕДОВАНИЕ
РАБОТЫ
ПАРОГЕНЕРАТОРОВ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

TALLINN 1989

698

ALUSTATUD 1937

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI
TOIMETISED

TRANSACTIONS OF TALLINN
TECHNICAL UNIVERSITY

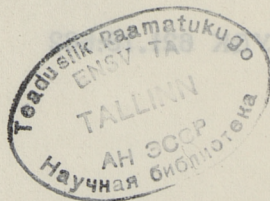
ТРУДЫ ТАЛЛИННСКОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

UDK 621.18:662

ИССЛЕДОВАНИЕ
РАБОТЫ
ПАРОГЕНЕРАТОРОВ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Теплоэнергетика XXXУ11

TALLINN 1989



ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Труды ТТУ № 698

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
Теплоэнергетика ХХХУ11

На русском языке

Отв. редактор В. Ратник

Техн. редактор М. Тамме

Сборник утвержден коллегией Трудов ТТУ 15.12.89

Подписано к печати 11.01.90

МВ-00318

Формат 60x90/16

Печ. л. 5,75 + 0,25 приложение

Уч.-изд. л. 4,71

Тираж 400

Зак. № 179

Цена 95 коп.

Таллинский технический университет,

200108 Таллин, Эхитаяте тээ, 5

Ротапринт ТТУ, 200006, Таллин, ул. Коскла, 2/9

© Таллинский технический университет, 1989

Р.Э. Роотамм, Л.М. Ыспуу,
В.В. Фадеев, К.Э. Раур

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОТОВОЙ ПЫЛИ СЛАНЦА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПЫЛЕСИСТЕМ КОТЛОВ ТП-67

I. Постановка вопроса

Одной из причин временного увеличения повреждаемости труб водяных экономайзеров котлов, как указывается в литературе [1] является крупный помол топлива в пылесистемах из-за неудовлетворительного технического состояния последних. С другой стороны, в последнее время усилилось внимание к качеству и количеству электрофильтровой золы, поставляемой сланцевыми электростанциями цементной промышленности и заводам стройиндустрии. Как качество, так и количество электрофильтровой золы зависят от технических характеристик и технического состояния не только золоулавливающего оборудования, но и пылеприготовительного оборудования через качество подаваемой в горелки котла готовой сланцевой пыли. Утонение помола должно увеличить выход электрофильтровой золы, а также снизить колебания её качества.

Проведенные ТТУ совместно с Прибалтийской ГРЭС испытания пылесистем котлов ТП-67 ст. № 20 и 26 имели цель определения гранулометрических характеристик подаваемой в горелки пыли при разных режимах работы, при разном техническом состоянии и при различном монтажном исполнении пылесистем. Необходимость проведения промышленных испытаний пылесистем определило и обстоятельство, что последние систематические испытания пылесистем были проведены в 1971 году (ЦКТИ), а испытания мельницы с малогабаритным сепаратором были проведены ВТИ в 1976 году, при этом на головном образце сепаратора (на пылесистеме 22 Г). В настоящее время на мельницах установлены модифицированные малогабаритные се-

параторы, кроме того на всех пылесистемах перешли на применение S-образных бил взамен П-образных.

В [1] результаты испытаний пылесистем связывали износом и повреждаемостью труб водяных экономайзеров. Ниже рассматриваем зависимость качества сланцевой пыли от режима работы и технического состояния пылесистем более подробно.

2. Описание оборудования

Котлы типа ТП-67 (ст. № И9-26) производства Таганрогского котельного завода "Красный котельщик" смонтированы на Прибалтийской ГРЭС в 1963-1966 гг.; имеют производительность $D_m = 78$ кг/с, параметры пара: температура 798/808 К, давление 13,7/2,2 МПа. Два котла включены в блок с турбиной типа К-200-130 ЛМЗ. Котел с камерным сжиганием пылевидного сланца, сухим шлакоудалением. Система пылеприготовления индивидуальная с прямым вдуванием. Топливо - эстонские и ленинградские сланцы с удельной теплотой сгорания $Q_i^r = 8400-9200$ кДж/кг, влажностью $W_t^r = 11-14$ %, зольностью $A^r = 42,5-44$ %, содержанием карбонатной двуокиси углерода $(CO_2)_m^r = 15,4-16$ %.

Топка котла призматической формы размерами в плане 8,65x15,2 м, высотой потолка 34,7 м. Турбулентные горелки конструкции ТКЗ-ОРГРЭС в количестве 8 штук расположены на фронтальной стене топки в 2 яруса на отметках 13 и 16 м, по 4 горелки в ярусе.

На котле 4 пылесистемы. Каждая из них (см. рис. 1) включает в себя: бункер сырого топлива емкостью 550 тонн, скребковый питатель типа СПУ-1100-8600 с регулируемой частотой вращения двигателя в пределах 8-25 1/с, молотковую мельницу типа ММТ-1500/2510/735, малогабаритный сепаратор конструкции ВТИ-Эстонглавэнерго, два пылепровода ϕ 720 x 10 мм. К одной пылесистеме подсоединены 2 горелки (см. рис. 2). Сушильным и транспортным готовой пыли агентом является горячий воздух температурой 550-620 К в количестве 35-50 % от общего количества воздуха, подаваемого в горелки.

Мельница молотковая с тангенциальным подводом воздуха, частотой вращения 12 1/с. Билы S-образной формы расположены в 21 ряд по 3 била в каждом, за исключением четырех крайних рядов, где установлено по 6 бил.

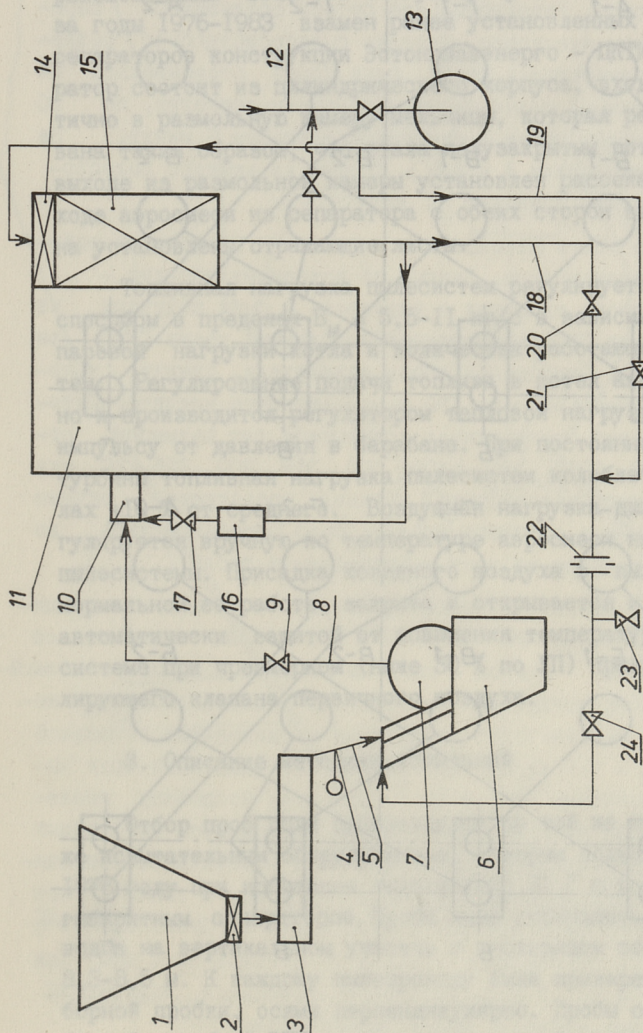


Рис. 1. Схема пылеприготовительной установки котла ТП-67.

1 - бункер слянца, 2 - отсекающий шибер, 3 - скребковый питатель, 4 - мигалка, 5 - тещка топлива, 6 - молотковая мельница, 7 - малогабаритный сепаратор, 8 - пылепровод, 9 - ремонтный шибер, 10 - горелка, 11 - котёл, 12 - всас дутьевого вентилятора, 13 - вентилятор, 14 - калорифер, 15 - воздухоподогреватель, 16 - короб вторичного воздуха, 17 - регулирующийся клапан вторичного воздуха, 18 - воздухоподогреватель, 19 - воздухоподогреватель, 20 - регулирующийся клапан первичного воздуха, 21 - регулирующийся клапан присадки холодного воздуха, 22 - измерительное устройство расхода первичного воздуха, 23 - атмосферный клапан, 24 - быстросакрывающийся клапан.

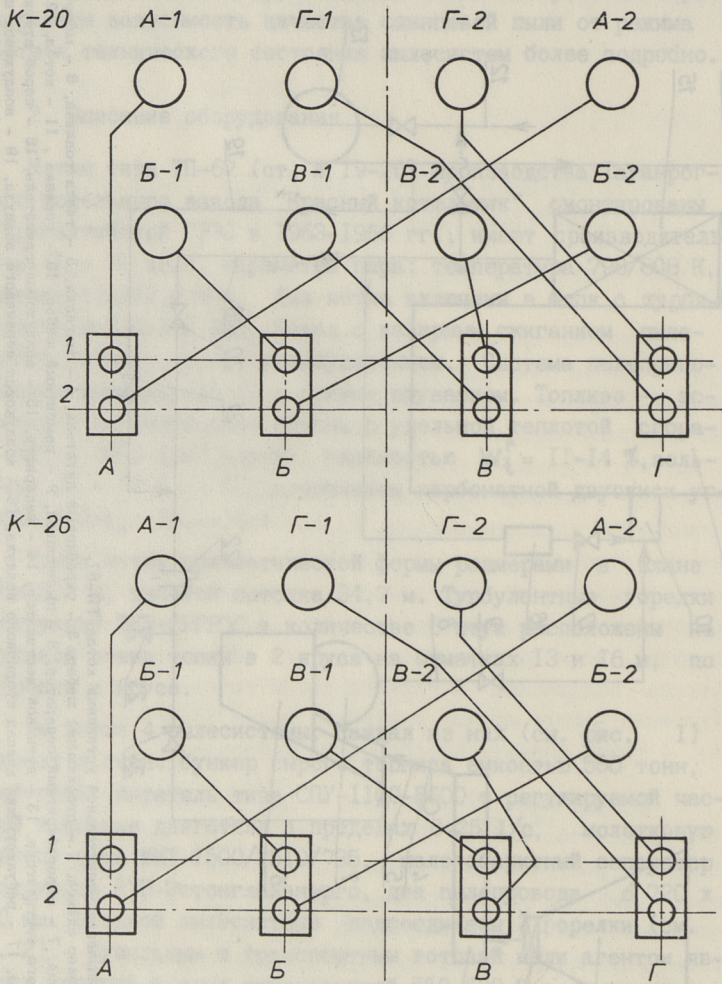


Рис. 2. Схема пылепроводов котлов ст. № 20 и 26.

Сепаратор пыли малогабаритный повышенной взрывобезопасности (см. рис. 3) разработан ПКБ Эстонглавэнерго по рекомендациям ВТИ. Эти сепараторы установлены на котлах за годы 1976-1983 взамен ранее установленных инерционных сепараторов конструкции Эстонглавэнерго - ЦКТИ [1]. Сепаратор состоит из цилиндрического корпуса, входящего частично в размольную камеру мельницы, которая реконструирована таким образом, что стала полузакрытым ротором. На выходе из размольной камеры установлен рассекатель, на выходе аэросмеси из сепаратора с обеих сторон выходного окна установлены отражающие листы.

Топливная нагрузка пылесистем регулируется групповым способом в пределах $V_M = 5,5-11$ кг/с в зависимости от паровой нагрузки котла и количества работающих пылесистем. Регулирование подачи топлива в котел автоматизировано и производится регулятором тепловой нагрузки котла по импульсу от давления в барабане. При постоянной нагрузке турбины топливная нагрузка пылесистем колеблется в пределах ± 10 % от среднего. Воздушная нагрузка пылесистем регулируется вручную по температуре аэросмеси на выходе из пылесистемы. Присадка холодного воздуха в пылесистему при нормальной ее работе закрыта и открывается и закрывается автоматически защитой от повышения температуры в пылесистеме при чрезмерном (ниже 30 % по УП) прикрытии регулирующего клапана первичного воздуха.

3. Описание методики испытаний

Отбор проб пыли производился по той же методике и тем же испытательным оборудованием, которым пользовался ВТИ в 1976 году при испытании пылесистемы 22 Г с головным малогабаритным сепаратором. Пробы пыли отбирались из пылепроводов на вертикальном участке с восходящим потоком на ∇ 8,3-8,5 м. К каждому пылепроводу были приварены по 2 отборной пробки, осями перпендикулярно. Пробы отбирались отборной трубкой ВТИ с диаметром входной насадки δ 16 мм, пыль отделялась из аэросмеси в циклоне δ 66 мм. Матерчатый фильтр не пользовались, так как по результатам более ранних испытаний определили, что фильтр улавливает всего около 3 % сланцевой пыли, что несущественно влияет на

представительность отобранных проб. Исокинетичность отбора пробы обеспечивалась регулированием скорости отсосов вентиляем за циклоном. Разряжение для отсоса создавалось переносным паровым эжектором. Сечение пылепровода было разделено на 6 равновеликих колец. Одна проба отсасывалась из 12 точек сечения пылепровода по одному диаметру, по 30 секунд из каждой точки с суммарным временем 6 минут. За один опыт отсасывали 4 пробы — по две из каждого пылепровода — суммарным временем 24 минуты.

Во время опыта фиксировались режимные показатели работы котла и пылесистемы. Данные по исходному топливу — удельная теплота сгорания и влажность — были получены из химлаборатории ГРЭС как средние по блочной части ГРЭС за день до опыта. Отобранные пробы взвешивали, сушили, квартовали и отбирали навеску 100 г для ситового анализа. Ситовый анализ проб производился комплектом сит размером отверстий 3000, 2000, 1250, 800, 500, 315, 200, 125, 80 мкм на вибрационной рассевочной машине с последующим ручным рассевом. Данные ситового анализа проб обрабатывались во взвешенную среднюю за опыт и приведены в табл. 1, 2, 3.

Согласно программы испытаний были к испытанию приняты пылесистемы котлов ст. № 20 и 26, из них первый как со слабым износом, второй — сильным износом водяного экономайзера. На обоих котлах все пылесистемы испытывались при новых билах, максимальной вентиляции и одинаковой топливной нагрузке $V_M = 7,0$ кг/с. На основе этих испытаний были выбраны пылесистемы 20 А и 26 Г для более подробных исследований. Опыты на этих пылесистемах проводились при новых и изношенных билах, при максимальной и минимальной вентиляции, при топливной нагрузке 7,0 и 8,8 кг/с, а также при среднем износе бил, средней вентиляции и нагрузке $V_M = 7,6 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$. Наконец, все пылесистемы котла № 26 испытывались еще при изношенных билах. В ходе испытаний проводился внутренний осмотр и обмер мельниц, бил и сепараторов.

4. Результаты обмера пылесистем

В табл. 4, 5 приведены данные обмера малогабаритных сепараторов котлов ст. № 20 и 26. Схема замеров приведена на рис. 3.

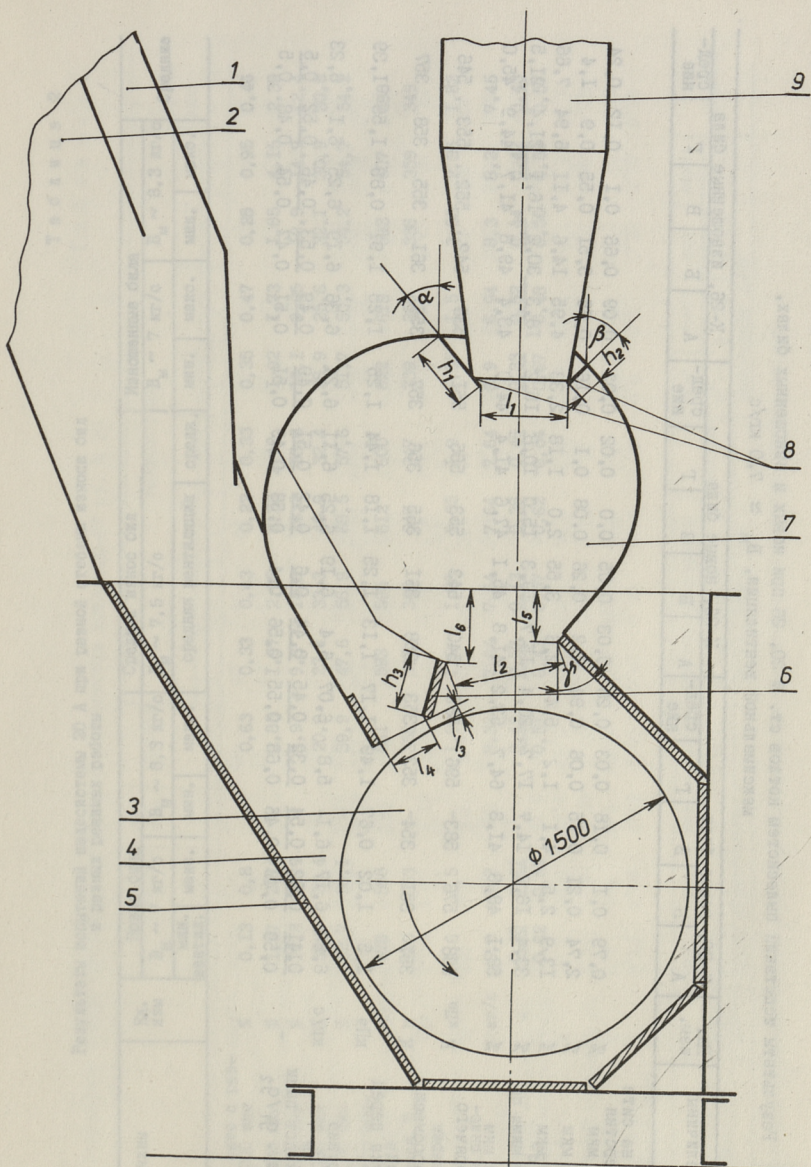


Рис. 3. Мельница ММТ-1500/2510/730 с малогабаритным сепаратором. 1 - течка топлива, 2 - воздухопровод, 3 - ротор мельницы, 4 - корпус мельницы, 5 - броня, 6 - рассекагель, 7 - малогабаритный сепаратор, 8 - отражающие листы, 9 - пылепровод. Буквами обозначены размеры, приведённые в табл. 4, 5.

Результаты испытаний плеселестем котлов ст. № 20, 26 при новых и изношенных билах,
максимальной вентиляции, $V_M \approx 7,0$ кг/с

Наименование величины	К-20, новые била			К-26, новые била			К-26, изношенные била					
	А	Б	Г	А	Б	Г	А	Б	Г			
Полный остаток на сите с размером отверстия 3000 мкм	0,79	0,1	0,18	0,03	0,05	0,0	0,02	0,09	0,66	0,1	0,12	0,24
То же, 1250 мкм	2,74	0,21	0,75	0,06	0,26	0,08	0,1	0,65	3,51	0,55	0,9	1,4
То же, 500 мкм	13,9	2,5	4,1	1,2	3,55	2,0	1,18	4,95	14,6	4,11	6,94	7,66
То же, 200 мкм	33,4	16,9	14,7	17,7	20,4	15,7	10,8	18,3	30,2	16,1	21,4	21,5
То же, 80 мкм	58,1	48,3	41,8	64,7	53,2	41,8	41,4	43,4	49,8	41,7	44,9	45,0
Температура горячего воздуха, $T_{гв}$	588	576	583	596	585	540	553	538	542	552	553	546
Температура аэросмеси, $T_{ас}$	351	351	354	353	353	358	355	355	361	355	358	357
Давление воздуха перед мельницей, H_M	1,5	1,02	0,67	1,49	1,17	1,13	1,18	1,25	1,91	0,85	1,55	1,39
Топливная нагрузка плеселестемы, V_M	6,22	6,17	6,1	5,8	6,07	6,4	6,19	6,11	6,19	6,25	6,1	6,23
Отношение расходов пыли по плетроводам, ρ_1/ρ_2	0,41	0,52	0,54	0,32	0,45	0,44	0,6	0,51	0,49	0,53	0,46	0,52
	0,59	0,48	0,46	0,68	0,55	0,56	0,4	0,49	0,51	0,47	0,54	0,48

Результаты испытаний пылесистемы 20 А при разной степени износа бил
 и разных режимах работы

Наименование величины	Ед. изм	Новые билы				Средний износ бил				Изношенные билы				Средние
		$V_M \sim 7$ кг/с		$V_M \sim 8,3$ кг/с		$V_M \sim 7,5$ кг/с		$V_M \sim 7$ кг/с		$V_M \sim 8,3$ кг/с				
		мин.	макс.	мин.	макс.	средняя вентиляция	средн.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	
Полный остаток на сите с раз- мером отверстия 3000 мкм	%	0,13	0,8	-	0,63	0,33	0,43	0,22	0,33	0,35	0,47	0,28	0,95	0,46
То же, 1250 мкм	%	1,37	2,74	-	2,85	1,97	2,95	2,33	2,42	1,92	1,73	1,85	4,15	2,39
То же, 500 мкм	%	12,3	13,9	-	8,9	9,8	14,8	16,2	13,6	11,1	9,35	12,9	14,9	12,4
То же, 200 мкм	%	36,6	33,4	-	20,9	23,1	33,3	40,9	32,4	28,9	25,6	32,1	30,9	30,6
То же, 80 мкм	%	59,7	58,1	-	39,9	47,6	56,9	68,5	57,6	51,7	50,3	54,2	54,7	54,2
Температура горячего воз- духа $T_{гв}$	К	578	588	-	581	593	595	612	600	622	613	593	607	598
Температура аэросмеси, $T_{ас}$	К	340	353	-	358	347	348	347	347	339	358	338	359	349
Давление воздуха перед мельницей, H_M	кПа	1,6	1,5	-	1,9	1,6	1,75	2,35	1,9	1,55	1,5	2,05	2,35	1,82
Топливная нагрузка пыле- системы, B_M	кг/с	6,9	6,2	-	8,33	7,64	7,64	7,64	7,64	6,9	6,94	8,3	8,3	7,45
Отношение расходов пыли по пылепроводам, g_1/g_2	-	0,38	0,41	-	0,43	0,57	0,43	0,38	0,46	0,33	0,52	0,44	0,42	0,43
		0,62	0,59		0,57	0,43	0,57	0,62	0,54	0,67	0,48	0,56	0,58	0,57

Результаты испытаний пылесистемы 26 Г при разной степени износа бил и разных режимах работы

Наименование величины	Ед. изм.	Новые биле		Средний износ бил		Изношенные биле		Средние					
		$V_M \sim 7$ кг/с		$V_M \sim 7,5$ кг/с		$V_M \sim 7,5$ кг/с							
		МИН.	МАКС.	МИН.	МАКС.	МИН.	МАКС.						
Полный остаток на сите с раз- мером отверстия 3000 мкм	%	0,17	0,02	0,04	0,02	0,01	0,08	0,09	0,0	0,1	0,16	0,25	0,09
То же,	%	0,4	0,1	0,2	0,21	0,33	0,71	0,7	0,58	0,1	0,9	1,67	0,55
То же,	%	2,74	1,18	2,35	2,55	4,65	6,45	6,12	5,74	1,45	6,94	1,88	3,93
То же,	%	15,4	10,8	14,4	13,0	20,4	22,5	22,3	21,7	6,94	21,4	24,5	18,2
То же,	%	42,7	41,4	41,0	36,9	53,0	51,3	51,6	52,0	22,1	44,9	55,2	43,9
Температура горячего возду- ха, $T_{гв}$	К	563	555	553	557	563	555	563	560	555	553	543	556
Температура воздуха, $T_{ас}$	К	340	360	332	359	346	347	350	348	328	358	358	346
Давление воздуха перед мельницей, P_M	кПа	1,33	1,44	2,13	2,54	1,7	2,04	1,9	1,84	1,63	1,55	2,42	1,91
Топливная нагрузка пыле- системы, V_M	кг/с	6,94	6,1	8,3	8,3	7,6	7,9	7,6	7,74	6,33	6,1	8,39	7,45
Отношение расходов пыли по пылепроводам, q_1/q_2	-	<u>0,64</u>	<u>0,51</u>	<u>0,55</u>	<u>0,4</u>	<u>0,5</u>	<u>0,52</u>	<u>0,53</u>	<u>0,52</u>	<u>0,48</u>	<u>0,52</u>	<u>0,32</u>	<u>0,5</u>
		0,36	0,49	0,45	0,6	0,5	0,48	0,47	0,48	0,52	0,48	0,68	0,5

Результаты обмера мельниц и сепараторов пшенистым котла ТШ-67 ст. № 20

Величина	Обозн.	Ед. изм.	Проект	Пшенистем										Сред-ние
				А		Б		В		Г				
				1	2	1	2	1	2	1	2			
Угол наклона заднего отражающего листа	α	0	40	40	40	44	35	39	49	35	49	41,5		
То же, переднего отражающего листа	β	0	45	43	85	85	85	85	32	24	28	47		
То же, закрывающего ротор мельницы листа	γ	0	45	48	53	45	47	50	54	56	52	51		
Ширина заднего отражающего листа	h_1	мм	290	285	280	285	280	295	290	310	295	290		
То же, переднего отражающего листа	h_2	мм	110	110	110	150	135	120	110	115	110	120		
То же, отбойного листа	h_3	мм	240	235	240	250	245	230	225	230	230	234		
Ширина выходного окна из сепаратора	l_1	мм	380	370	360	375	370	360	355	350	365	363		
То же, выходного из размольной камеры	l_2	мм	490	390	420	430	430	380	430	450	455	423		
Расстояние между отбойным листом и ротором мельницы	l_3	мм	40	120	155	150	175	105	120	135	140	138		
Ширина канала возврата	l_4	мм	210	260	260	230	250	255	230	205	240	242		
Расстояние от фланца мельницы до верхнего края закрывающего ротор листа	l_5	мм	200	175	175	160	175	190	195	185	205	183		
Расстояние от фланца мельницы до отбойного листа	l_6	мм	320	275	260	255	210	260	265	290	280	262		

Примечание: 1 - размеры со стороны котла,

2 - размеры со стороны электродвигателя

Результаты обмера мельниц и сепараторов плеснеистем котла ТП-67 ст. № 26

Величина	Сбозн.	Ед. изм.	Проект	Плеснеистема								Средние
				А		Б		В		Г		
				1	2	1	2	1	2	1	2	
Угол наклона заднего отражающего листа	α	°	40	43	47	40	36	42	40	45	45	42
То же, переднего отражающего листа	β	°	45	52	50	27	30	33	30	55	45	39
То же, закрывающего ротор мельницы	γ	°	45	49	48	49	47	43	43	45	46	46
Ширина заднего отражающего листа	h_1	мм	290	310	310	300	300	290	290	300	280	298
То же, переднего отражающего листа	h_2	мм	110	110	120	120	120	120	120	120	110	116
То же, отбрасного листа	h_3	мм	240	270	250	230	240	230	250	230	230	243
Ширина выходного из сепаратора окна	l_1	мм	380	350	330	320	330	330	350	340	350	340
То же, входного из развольной камеры окна	l_2	мм	480	430	460	430	460	430	430	440	440	436
Расстояние между отбрасным листом и ротором мельницы	l_3	мм	40	140	160	150	160	130	110	170	170	154
Ширина канала возврата	l_4	мм	210	220	220	230	230	220	200	220	230	223
Расстояние от впадины мельницы до верхнего края закрывающего ротора листа	l_5	мм	200	210	170	200	200	170	190	210	200	194
Расстояние от впадины мельницы до отбрасного листа	l_6	мм	320	270	270	280	270	280	280	170	270	275

См. примечание табл. 4.

Все сепараторы изготавливаются заводским способом и на котлах заменяются в каждый капитальный ремонт. Как видно из таблиц, дефекты изготовления и монтажа вполне заметны. Так, например, на всех сепараторах расстояние между ротором мельницы и отбойным листом в несколько раз превышает проектное, на сепараторах котла ст. № 26 ширина выходного окна из сепаратора меньше проектного в среднем на 10 %. Всё это влияет на аэродинамику движения сушильного агента и мельничного продукта. Как показано в [2], самым влияющим на тонкость помола готовой пыли — это угол наклона закрывающего ротор листа γ , который определяет направление движения мельничного продукта. При малых размерах установки и интенсивном процессе сепарации конструктивные отклонения имеют большое значение.

5. Анализ результатов промышленных испытаний пылесистем

В таблицах I, 2, 3 приведены результаты испытаний пылесистем.

Из табл. I видно, что на котле ст. № 26 при новых билах и максимальной вентиляции готовая пыль более тонкая и более однородная, чем на котле ст. № 20. При этом износ водяного экономайзера на котле № 26 более интенсивный, чем на котле ст. № 20. При изношенных билах на котле ст. № 26 помол укрупняется и однородность пыли существенно ухудшается. Это также видно на рис. 4.

На котле ст. № 20 общую картину путает пылесистема 20 А, где при новых билах пыль по тонине и однородности на том же уровне, как на пылесистемах котла ст. № 26 при изношенных билах. Таким образом, если не принимать во внимание пылесистему 20 А, при новых билах характеристики готовой пыли вполне удовлетворительные — остатки на ситах колеблются в пределах: $R_{80} = 43,4-64,7\%$, $R_{500} = 1,2-4,1\%$, $R_{1250} = 0,1-0,75\%$. Почти на всех пылесистемах в пробах были зерна размером более 3 мм.

$$R\% = 100[1 - \Phi(\ln(\frac{x}{d}))^m]$$

$$d : R = 50\%$$

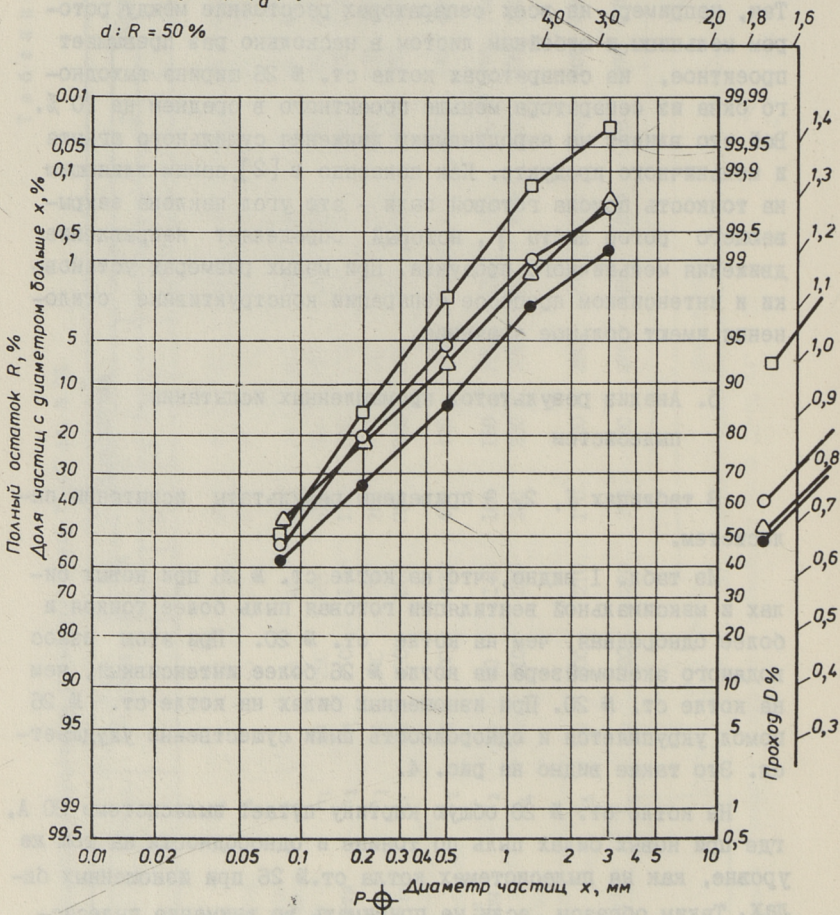


Рис. 4. Гранулометрическая характеристика пыли.

- - средняя по пылесистемам котла ст. № 20 при новых билах, средней вентиляции, $V_M = 6,07$ кг/с;
- - средняя по пылесистемам котла ст. № 28 при новых билах, средней вентиляции, $V_M = 6,11$ кг/с;
- △ - средняя по пылесистемам котла ст. № 28 при изношенных билах, средней вентиляции, $V_M = 6,23$ кг/с;
- - пылесистема 20 А при новых билах, средней вентиляции, $V_M = 6,22$ кг/с.

Результаты более тщательных испытаний пылесистем 20 А и 26 Г приведены в таблицах 2, 3 и на рис. 5,6.

Пылесистема 20 А выдает пыль более крупного помола, чем пылесистема 26 Г. Массовое распределение пыли по пылепроводам 26 Г одинаковое, а по пылепроводам 20 А не равномерное (0,43:0,57). Зависимость тонины помола от износа бил на пылесистеме 20 А заметно слабее, чем на пылесистеме 26 Г. Зависимость тонины помола от топливной нагрузки на пылесистеме 20 А при новых билах и среднем износе бил слабая, только при изношенных билах наблюдается укрупнение помола с увеличением нагрузки мельницы. Зависимость тонины помола от вентиляции мельницы на 20 А слабая.

Как видно из табл. 6, неравномерное массовое распределение пыли по пылепроводам 20 А сопровождается и различным качеством пыли — в пылепроводе 2 пыль более крупная. Из табл. 4 видно, что на 20 А закрывающий ротор лист смонтирован косо: со стороны котла (пылепровод 1) угол $\gamma = 48^\circ$ (по проекту 45°), со стороны электродвигателя (пылепровод 2) $\gamma = 53^\circ$. Ширина выходного окна из размольной камеры со стороны электродвигателя больше, чем со стороны котла.

Различия в размерах имеются и на других пылесистемах котла ст. № 20, где распределение пыли по пылепроводам также различно (см. табл. 1), при этом различия обратные тому, что наблюдается на 20 А. Таким образом, результаты опыта пылесистем котла ст. № 20 плохо связываются с результатами анализа гранулометрического состава выдаваемой пыли.

На пылесистеме 26 Г гранулометрический состав готовой пыли (см. табл. 3) приблизительно такой же, как на остальных испытанных пылесистемах, за исключением 20 А. Данные испытаний пылесистемы 26 Г характеризуют вероятно большинство пылесистем котлов ТП-67. Среднеэксплуатационный остаток на сите размером ячейки 80 мкм $R_{80} = 43,9\%$, остаток на сите ячейкой 500 мкм $R_{500} = 3,93\%$, остаток на сите ячейкой 1250 мкм $R_{1250} = 0,55\%$. Колебания полных остатков на ситах по результатам испытаний 26 Г: $R_{80} = 22,1 - 53\%$, $R_{500} = 1,18 - 6,9\%$, $R_{1250} = 0,1 - 1,67\%$.

$$R\% = 100[1 - \Phi(\ln(\frac{x}{d})^m)]$$

$$d: R = 50\%$$

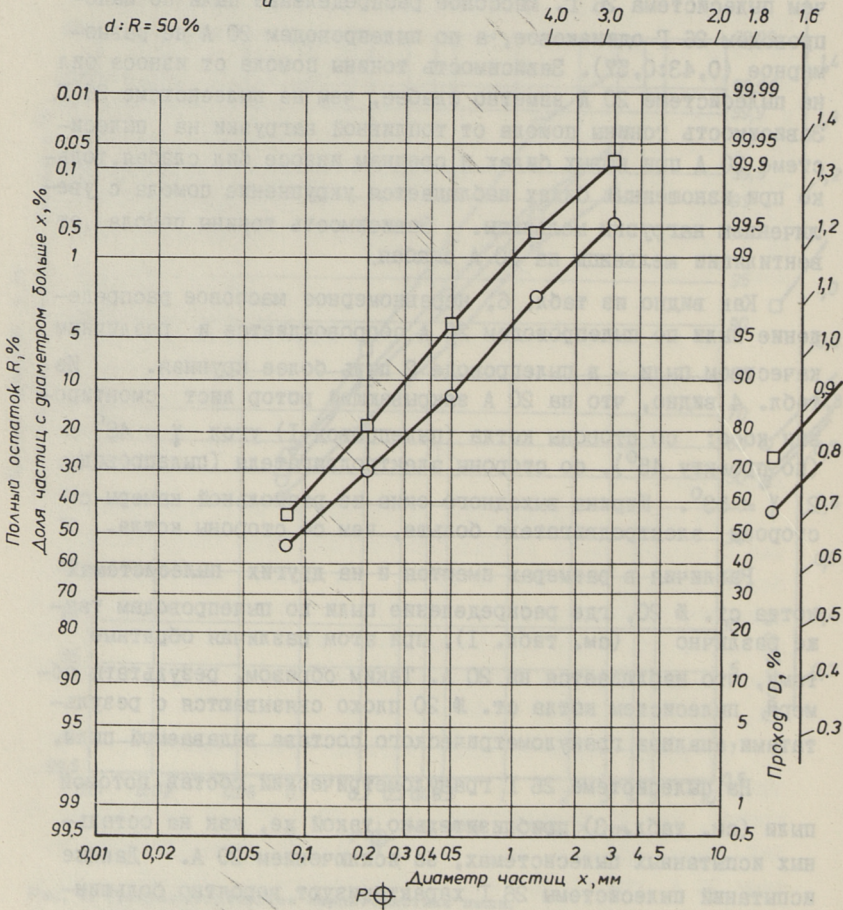


Рис. 5. Гранулометрическая характеристика пыли.

- - среднеэксплуатационная пылесистемы 20 А, $t_{2\theta} = 598$ К, $t_{ас} = 349$ К, $H_M^1 = 1,82$ кПа, $V_M = 7,5$ кг/с;
- - среднеэксплуатационная пылесистемы 26 Г, $t_{2\theta} = 556$ К, $t_{ас} = 346$ К, $H_M^1 = 1,91$ кПа, $V_M = 7,45$ кг/с.

$$R\% = 100 [1 - P(\ln(\frac{x}{d})^m)]$$

$$d:R = 60\%$$

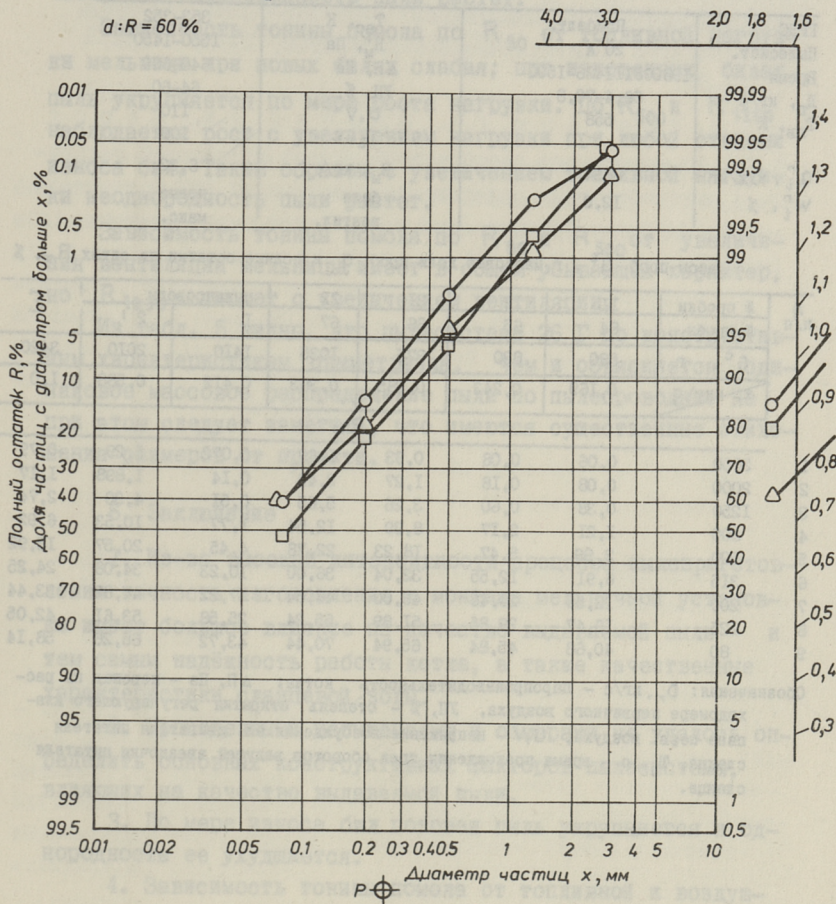


Рис. 6. Гранулометрическая характеристика пыли пылесистемы 26 Г.

○ - среднеэксплуатационная при новых билах, $t_{2\phi} = 557$ К,
 $t_{ac} = 348$ К, $H'_M = 1,86$ кПа, $V_M = 7,43$ кг/с;

□ - среднеэксплуатационная при среднем износе бил, $t_{2\phi} = 560$ К,
 $t_{ac} = 348$ К, $H'_M = 1,84$ кПа, $V_M = 7,74$ кг/с;

△ - среднеэксплуатационная при изношенных билах, $t_{2\phi} = 551$ К,
 $t_{ac} = 344$ К, $H'_M = 2,0$ кПа, $V_M = 7,28$ кг/с.

Таблица 6

Результаты ситового анализа пыли

ГРЭС	Прибалт.	T_{ac} , К	353-352
Пылесист.	20 А	H_M^1 , Па	1550-1450
Время	I98208III426-I500	ΔH , Па	640-600
D_n , кг/с	69,4-70,8	УП, %	64-60
$T_{ГВ}$, К	558	U, V	II0
		T_3 , с	I00
Q_L^r , кДж/кг	8694	B_M , кг/с	6,22
W_t^r , %	I2,0	била	новые
		вентил.	макс.

Массы проб Q^c , г, массовые доли проб g и полные остатки на ситах R_x , %

№ п/п	№ пробки	I1	I2	2I	22	пылепроводы		Σ
	№ пробы	64	65	66	67	I	2 I	
	Q^c , г	580	830	975	1035	I4I0	20I0	3420
	x , мкм\g	0,169	0,243	0,285	0,303	0,4I2	0,588	I,0

R_x

I	3000	0,06	0,08	0,93	I,63	0,072	I,29	0,79
2	2000	0,08	0,18	I,27	2,49	0,14	I,898	I,17
3	I250	0,38	0,60	3,26	5,65	0,5I	4,30	2,74
4	800	I,2I	2,17	8,39	I2,54	I,77	10,53	6,92
5	500	2,99	5,47	18,23	22,78	4,45	20,57	13,92
6	3I5	6,9I	I2,55	32,04	36,00	10,23	34,08	24,25
7	200	I2,55	20,48	43,00	46,54	I7,22	44,82	33,44
8	I25	I9,47	29,85	5I,89	55,24	25,58	53,6I	42,05
9	80	40,68	45,84	65,94	70,44	43,72	68,26	58,14

Обозначения: D_n , кг/с - паропроизводительность котла; ΔH , Па - перепад на расходомере первичного воздуха, УП, % - степень открытия регулирующего клапана перв. воздуха, U, V - напряжение возбуждения эл. двигателя питателя сланца, T_3 , с - время прохождения трех оборотов ведущей звездочки питателя сланца.

Распределение пыли по пылепроводам равномерное. Зависимость тонины помола от износа бил характеризуется максимумом по R_{80} при среднем износе бил; по R_{500} и R_{1250} наблюдается постоянный рост по мере износа бил. Это означает, что неоднородность пыли растет.

Зависимость тонины помола по R_{80} от топливной нагрузки мельницы при новых билах слабая; при изношенных билах пыль укрупняется по мере роста нагрузки. По R_{500} и R_{1250} наблюдается рост с увеличением нагрузки при любой степени износа бил. Таким образом с увеличением топливной нагрузки неоднородность пыли растет.

Зависимость тонины помола по R_{80} и R_{500} от увеличения вентиляции мельницы имеет в общем убывающий характер, но R_{1250} растет с увеличением вентиляции.

Из табл. 5 видно, что пылесистема 26 Г по конструктивным характеристикам симметрична, чем и объясняется одинаковое массовое распределение пыли по пылепроводам. Но при этом следует заметить, что имеются существенные отклонения размеров от проекта.

6. Заключение

1. Из-за высокой интенсивности процесса пылеприготовления точность изготовления и монтажа мельничной установки имеет большое влияние на качество выдаваемой пыли и тем самым надёжность работы котла, а также качественные характеристики сланцевой золы.

2. Проведенными испытаниями и обмерами не удалось определить основных конструктивных факторов пылесистемы, влияющих на качество выдаваемой пыли.

3. По мере износа бил готовая пыль укрупняется и однородность ее ухудшается.

4. Зависимость тонины помола от топливной и воздушной нагрузки мельницы при новых билах слабая и усиливается по мере износа бил в сторону укрупнения помола с увеличением нагрузки.

5. Имеются отдельные пылесистемы, выдающие, по сравнению с остальными, более крупную и неоднородную пыль (20 А и 26 Б), особенно при изношенных билах. Натурными обмерами мельниц и сепараторов причины этого не выявились.

Л и т е р а т у р а

1. Роотамм Р.Э., Ыйспуу Л.М., Раюр К.Э., Соловей А.Г. Надежность работы поверхностей нагрева водяных экономайзеров котлов ТП-67 // Труды Таллиннского политехнического института, 1985, № 599. С. 61-72.

2. Роотамм Р.Э., Ыйспуу Л.М., Вюрст Э.Р. Об испытаниях лабораторной модели молотковой мельницы с малогабаритным сепаратором конструкции ВТИ-Эстонглав-энерго // Труды Таллиннского технического университета, 1989. См. наст. сб., с. 24

Die Abhängigkeit der Brennschieferstaubcharakteristiken
vom technischen Zustand der Staubaufbereitungs-
richtungen der Kesselanlagen TP-67

Zusammenfassung

Es werden die Ergebnisse der Betriebsuntersuchungen dargelegt, die auf den Staubaufbereitungsanlagen von Hammermühlen mit einem kleinräumigen Separator Typ VTI-Eesti Energia der Kesselanlagen TP-67 durchgeführt wurden. Es wurde bewiesen, daß wegen der großen Separationsintensität in kleinräumigen Separationsanlagen die Herstellungs- und Montagegenauigkeit sehr starken Einfluß auf die Staubqualität ausübt.

R. Rootamm, L. Öispuu,
V. Fadejev, K. Rajur

Põlevkivitolmu karakteristikute sõltuvus katelde
TP-67 tolmustussüsteemide tehnilisest seisundist

Kokkuvõte

Artiklis on toodud katelde TP-67 tolmustussüsteemide - ÜSI-Eesti Energia tüüpi väiksegabariidiliste separaatoritega varustatud haamerveskite tööstuskatsete tulemused. Väidetakse, et tingituna separatsiooniprotsessi suurest intensiivsusest väiksegabariidilises separaatoris mõjutab tolmustussüsteemi valmistamise ja monteerimise täpsus suuresti valmistolmu kvaliteeti.

Р.Э. Роотамм, Л.М. Ыйспуу,
Э.Р. Вюрст

ОБ ИСПЫТАНИЯХ ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ МОЛОТКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С МАЛОГАБАРИТНЫМ СЕПАРАТОРОМ КОНСТРУКЦИИ ВТИ - ЭСТОНГЛАВЭНЕРГО

1. Постановка вопроса

В работе [1] приводятся результаты промышленных испытаний пылесистем котлов ТП-67, которые не выявляют основные факторы конструктивного характера, влияющие на качество готовой сланцевой пыли, а также неравномерность массового распределения пыли по пылепроводам одной пылесистемы. Поэтому приведенные там рекомендации по улучшению положения по качеству пыли имеют общий характер - повысить точность изготовления и монтажа пылесистем. Но нет рекомендации по мерам, направленным на управление качеством пыли и уменьшению колебаний качества в зависимости от степени износа бил, что важно с точки зрения увеличения надежности работы котлов [2] и обеспечения требуемого качества электрофильтовой золы для цементной промышленности.

В целях более тщательного исследования процессов, протекающих в малогабаритном сепараторе, была изготовлена лабораторная установка, результаты испытаний которого ниже излагаются.

2. Описание лабораторной модели и методики испытаний

Для изучения процессов, протекающих в молотковой мельнице и сепараторе, была изготовлена модель мельницы ММТ 1500/2510/730 с модифицированным малогабаритным сепарато-

ром в линейном масштабе 1:5. Диаметр ротора мельницы 300 мм, длина ротора 44 мм, длина сепаратора 50 мм. Количество бил 16, установленные в два ряда; ширина бил 9 мм. Скорость вращения ротора может быть регулирована от 14 до 100 1/с двигателем постоянного тока.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 1. Исходный материал подается в мельницу винтовым питателем. Транспортный воздух комнатной температуры подается в мельницу через расходомерное устройство. Готовая пыль отделяется из воздуха в циклоне и матерчатом фильтре. Воздух просасывается через установку вентилятором.

Модель сепаратора устроена так, что отбойный лист (поз. 6 на рис. 3 [1]) поворачивается вокруг своей оси и может быть перемещен в горизонтальном направлении, угол наклона закрывающего ротор листа может быть изменен на $\pm 15^\circ$ от проектного положения. Мельница и сепаратор имеют прозрачную торцевую стену для визуального наблюдения.

Испытания лабораторной установки проводились при окружной скорости бил, высчитанной из условия равенства критерия Фруда промышленной и лабораторной мельницы, равенств в удельной нагрузке ротора мельницы по воздуху и топливу. Исходное топливо - фракция 0-5 мм воздушно-сухого сланца добычи шахты "Ахтме". Количество пропускаемого через установку за один опыт топлива - 1 кг. Гранулометрический анализ готовой пыли проводился указанным в [1] комплектом сит.

3. Результаты испытаний

Первая серия опытов проводилась фракциями топлива 0-5 мм, 3-5 мм, 5-7 мм, 7-10 мм, 10-15 мм при проектном положении всех регулируемых элементов сепаратора; данные по этим опытам приведены в табл. 1 и на рис. 2. Как видно, по мере роста крупности начального материала укрупняется несколько и готовая пыль, особенно в "хвосте" - в части крупных фракций; в части тонких фракций (до 500 мкм) картина более запутана и можно сказать, что измельчения в лабораторной установке фракций сланца 3-5 мм, 5-7 мм, 7-10 мм и 10-15 мм мало чем между собой отличаются. При этом от-

$$R\% = 100[1 - \Phi(\ln(\frac{x}{d})^m)]$$

$$d:R = 50\%$$

$$m = \frac{1}{b}$$

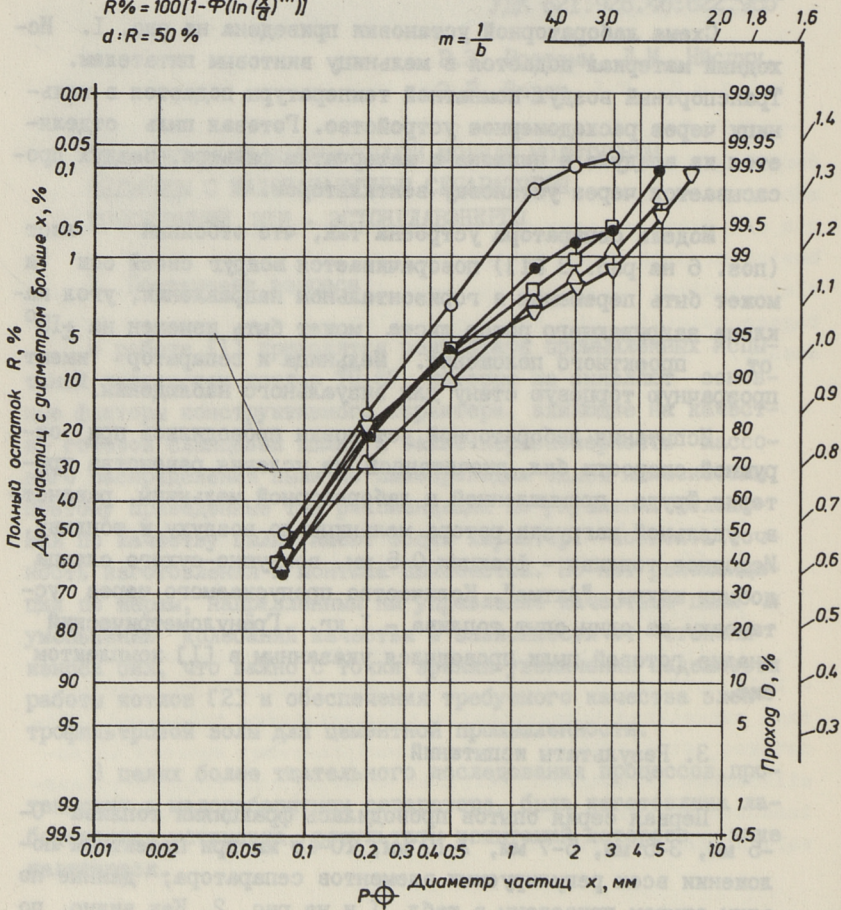


Рис. 1. Гранулометрическая характеристика пыли при помоле исходного сланца разной крупности.

○ - фракция 0-5 мм, □ - фракция 3-5 мм, ● - фракция 5-7 мм, △ - фракция 7-10 мм, ▽ - фракция 10-15 мм.

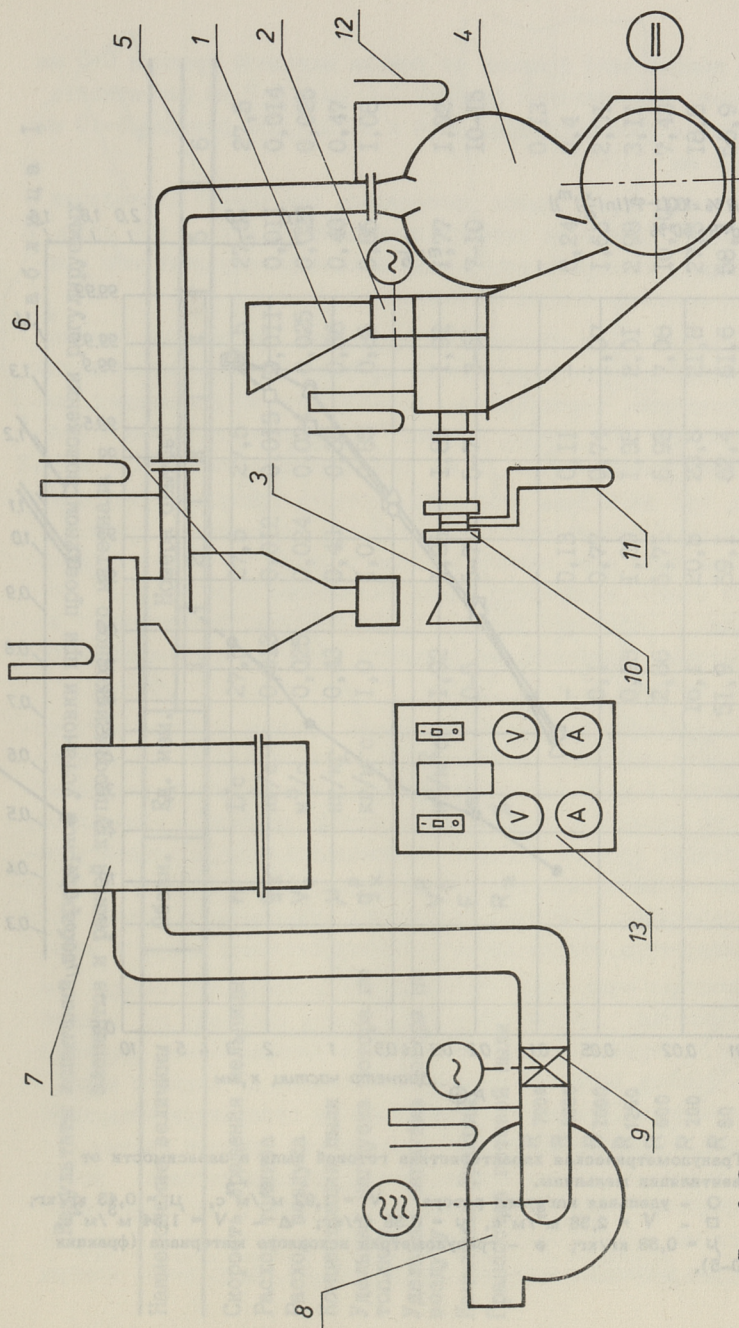


Рис. 2. Схема лабораторной установки.

1 - бункер исходного топлива, 2 - винтовой питатель, 3 - всасывающая труба, 4 - молотковая мельница с малогабаритным сепаратором, 5 - пылепровод, 6 - циклон, 7 - матерчатый фильтр, 8 - вентилятор, 9 - регулирующийся клапан, 10 - расходомерное устройство, 11, 12 - дифманометры, 13 - пульт управления.

$$R\% = 100[1 - \Phi(\ln(\frac{x}{d})^m)]$$

$$d: R = 50\%$$

$$m = \frac{1}{b}$$

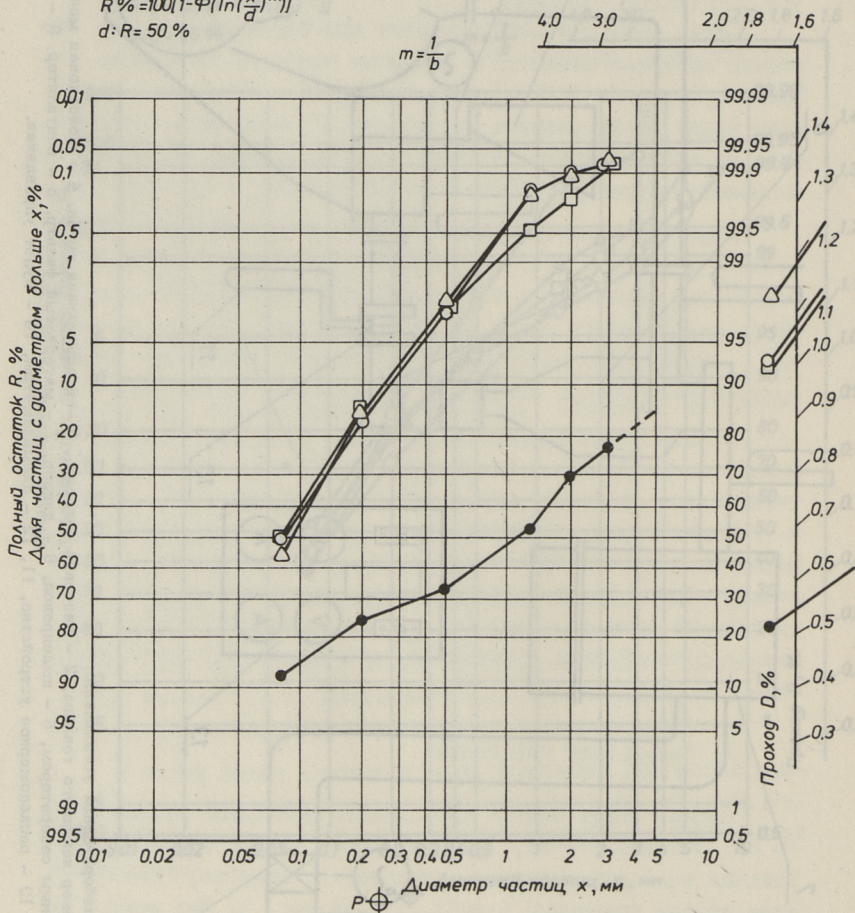


Рис. 3. Гранулометрическая характеристика готовой пыли в зависимости от вентиляции мельницы.

\circ - удельная нагрузка ротора $V = 1,92 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$, $\mu = 0,43 \text{ кг}/\text{кг}$;
 \square - $V = 2,38 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$, $\mu = 0,38 \text{ кг}/\text{кг}$; Δ - $V = 1,54 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$,
 $\mu = 0,58 \text{ кг}/\text{кг}$; ● - гранулометрия исходного материала (фракции 0-5).

Результаты испытаний лабораторной установки при проектном положении регулируемых элементов и разной крупности исходного материала

Наименование величины	Обозн.	Ед. изм.	Номера опытов						
			I	2	3	4	5	6	
Скорость вращения мельницы	n	1/с	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5
Расход топлива	g_k	кг/с	0,013	0,012	0,013	0,011	0,011	0,011	0,014
Расход воздуха	V_b	м ³ /с	0,025	0,024	0,024	0,025	0,023	0,023	0,025
Концентрация пыли	μ	кг/кг	0,43	0,43	0,38	0,36	0,40	0,40	0,47
Удельная нагрузка ротора по топливу	g_k^p	кг/м ² с	1,0	1,0	0,85	0,85	0,85	0,85	1,08
Удельная нагрузка ротора по воздуху	V_b^p	м ³ /м ² с	1,92	1,85	1,85	1,92	1,77	1,92	1,92
Начальная фракция	F	мм	0-5	5-7	5-7	3-5	7-10	7-10	10-15
Грансостав готовой пыли	R_{20}	%	-	-	-	-	-	-	0,13
	R_{7000}		-	0,13	0,11	-	0,24	0,4	0,4
	R_{5000}		-	0,77	0,74	-	1,63	2,01	2,01
	R_{2000}		0,1	1,29	1,38	1,07	2,98	3,11	3,11
	R_{1250}		0,18	5,71	6,93	7,08	10,10	7,43	7,43
	R_{500}		2,86	20,8	23,8	21,8	27,8	18,8	18,8
	R_{200}		16,1	69,1	62,4	61,6	58,4	56,9	56,9
	R_{80}		51,9						

личие помола этих фракций от помола исходной фракции 0-5 мм заметное. Для исходных фракций 3-5 мм и 5-7 мм вероятность разрушения соответственно 99,4 и 99,9 %, для фракций 5-10 мм и 10-15 мм - 100 %.

Вторая серия опытов проводилась при разной вентиляции установки, данные по которой приведены на рис. 3 и в табл. 2. Как видно, изменение вентиляции мельницы несущественно влияет на тонкость помола топлива.

Третья серия опытов была проведена при разных положениях отбойного листа на выходе из помольной камеры мельницы: при проектном, вертикальном, горизонтальном положениях, наклонных на 45° вперед и назад, перемещенном ближе к задней стене мельницы на 15 мм при проектном наклоне. Из табл. 2 видно, что положение отбойного листа на гранулометрический состав пыли влияет слабо. Значительное улучшение гранулометрии пыли дает наклон отбойного листа на 45° в сторону задней стенки сепаратора из-за уменьшения доли частиц, отражающихся с отбойного листа в поток воздуха, выходящего из сепаратора. Движение мельничного продукта в сепараторе показано на рис. 4.

Результаты опытов с изменением наклона закрывающего ротор листа показаны на рис. 5. При отклонении от проектного положения в одну или другую сторону готовая пыль укрупняется. Это связано с изменением картины движения в сепараторе. Мельничный продукт выходит из помольной камеры концентрированным потоком, скользя по закрывающему ротор листу и, пролетев сепаратор, частично отвеиваясь, ударяется о заднюю стенку сепаратора, откуда двумя потоками скользит вверх и вниз. Двигающийся вниз поток возвращается в помольную камеру и домальвается. Двигающийся вверх поток скользит по задней стенке, теряет скорость и падает в сепарационное пространство. Часть крупного материала скользит до заднего отражающего листа, падает в выходящий из сепаратора воздушный поток и подхватывается им. Большинство крупных частиц, скользивших по задней стенке вверх, проваливаются в поток мельничного продукта из размольной камеры и частично увлекаются им. Провалившиеся через сепаратор частицы падают на ротор мельницы в районе выходного из размольной камеры

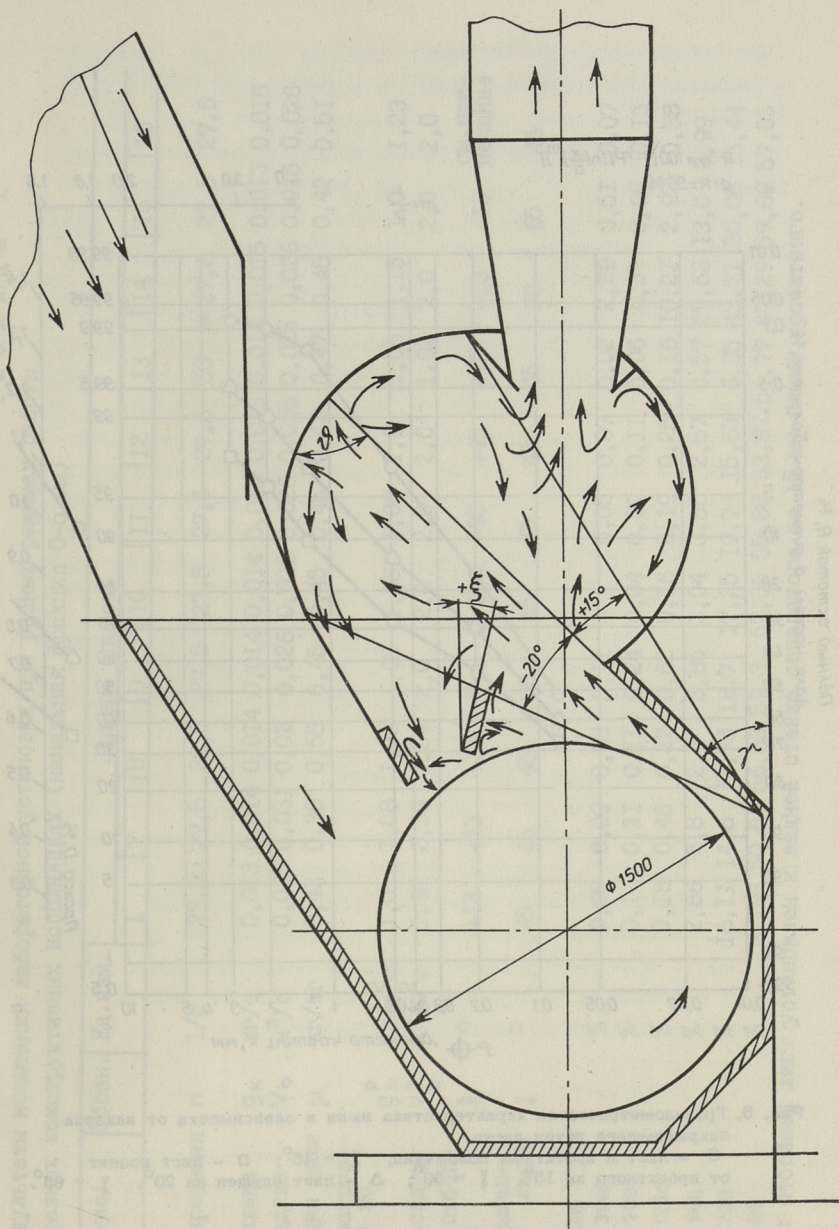


Рис. 4. Схема движения мельничного продукта в сепараторе.
 α - угол встречи материала с задней стеной сепаратора.

$$R\% = 100[1 - \Phi(\ln(\frac{x}{d})^m)]$$

$$d: R=50\%$$

$$m = \frac{1}{b}$$

4.0 3.0 2.0 1.8 1.6

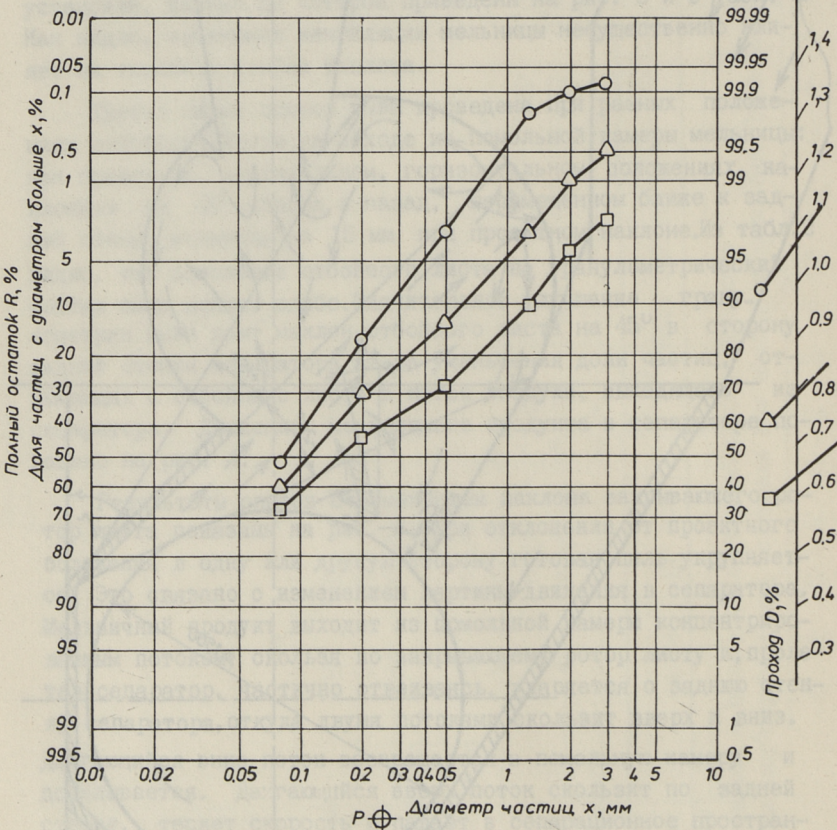


Рис. 5. Гранулометрическая характеристика пыли в зависимости от наклона закрывающего ротор листа.
 ○ - лист в проектном положении, $\gamma = 45^\circ$; □ - лист поднят от проектного на 15° , $\gamma = 30^\circ$; Δ - лист опущен на 20° , $\gamma = 65^\circ$.

Результаты испытаний лабораторной установки при разных режимах работы и разных конструктивных исполнениях (начальная фракция 0-5 мм)

Наименование величины	Обозн.	Ед. изм.	Номера опытов													
			I	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16			
Скорость вращения мельницы	n	1/с	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5
Расход топлива	g _к	кг/с	0,013	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,013	0,014	0,014	0,015	0,013	0,016	0,016
Расход воздуха	V _в	м ³ /с	0,025	0,031	0,02	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,025	0,026	0,026	0,026	0,026
Концентрация пыли	μ	кг/кг	0,43	0,38	0,58	0,45	0,45	0,45	0,45	0,42	0,42	0,47	0,48	0,42	0,51	0,51
Удельная нагрузка ротора по топливу	g _к	кг/м ² с	1,0	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,0	1,08	1,15	1,0	1,0	1,23	1,23
То же по воздуху	V _в	м ³ /м ² с	1,92	2,38	1,54	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,92	2,0	2,0	2,0	2,0
Положение отбойного листа	ξ	0	+13	+13	+13	0	-45	-90	+13	+13	+13	+13	+13	+13	+13	см. при- мечание
Полож. закрывающего ротор листа	γ	0	45	45	45	45	45	45	45	45	45	30	65	65	45	45
Грансостав готовой пыли	R	%	0,08	0,09	0,08	0,11	-	0,05	0,07	0,02	0,02	2,29	0,51	0,07	0,13	0,13
R 3000		%	0,1	0,21	0,11	0,24	0,04	0,07	0,11	0,06	0,06	4,31	0,98	0,13	0,13	0,13
R 2000		%	0,18	0,46	0,22	0,62	0,16	0,19	0,25	0,16	0,16	10,21	2,93	0,38	0,38	0,38
R 1250		%	2,86	2,8	2,4	3,85	3,04	3,56	2,57	0,57	27,63	13,0	2,99	2,99	2,99	2,99
R 500		%	16,11	14,6	13,78	18,7	17,25	19,7	15,63	6,35	43,71	30,06	15,44	15,44	15,44	15,44
R 200		%	51,93	50,64	56,62	59,3	57,35	55,88	53,87	51,77	67,29	59,69	57,03	57,03	57,03	57,03
R 80		%														

Примечание: отбойный лист установлен к задней стенке сепаратора на 15 мм ближе проектного.

окна и могут быть изношенными поверхностями бил заброшены в любом направлении, в том числе и прямо в выходное окно сепаратора.

При опускании закрывающего ротор листа вниз ($\gamma > 45^\circ$ [II]) уменьшается угол встречи α мельничного продукта с задней стеной (см. рис. 4) и заметно увеличивается доля материала, скользящего вверх. При этом в верхней части размольной камеры концентрация материала увеличивается. Этот процесс имеет прогрессивный характер: сопротивление сепаратора растет, расход воздуха уменьшается, падающий сверху на поток мельничного продукта материал клонит его еще больше вниз и угол встречи α еще больше уменьшается. Это было замечено и при промышленных испытаниях - при малой вентиляции некоторых пылесистем устанавливалось вроде две точки равновесия вентиляции: при этом в нижней точке равновесия имелся малый расход воздуха и высокое сопротивление установки. Эта точка равновесия была очень неустойчивой и мельница часто заваливалась (перегружалась).

При подъеме закрывающего ротор листа ($\gamma < 45^\circ$) доля возврата увеличивается. При чрезмерном подъеме этого листа увеличивается доля забрасываемых прямо в пылепровод частиц, особенно при изношенных билах.

Таким образом, можно утверждать, что основным фактором, влияющим на режим работы сепаратора и на гранулометрические характеристики готовой пыли, является угол встречи α мельничного продукта с задней стенкой сепаратора, что в большой мере определяется качеством изготовления и монтажа. Этим можно объяснить и крупный помол на пылесистеме 20 А [I], и перекос в массовом распределении пыли по отдельным пылепроводам и различие гранулометрического состава пыли по ним - закрывающий ротор лист был установлен косо.

4. Заключение

I. Лабораторными исследованиями на модели молотковой мельницы и сепаратора выявилось, что основным фактором, влияющим на качество готовой пыли, является угол встречи мельничного продукта с задней стенкой сепаратора: при угле встречи 90° и более большая часть мельничного продукта попадает

в возврат, при угле встречи менее 90° большая часть мельничного продукта попадает в район выходного окна сепаратора и выносится в пылепровод. По мере износа бил увеличивается доля частиц, забрасываемых билами прямо в пылепровод.

2. Малогабаритный сепаратор следует реконструировать таким образом, чтобы угол встречи мельничного продукта с задней стенкой сепаратора был более 90° даже при сильном износе бил, а выходное окно перемещать на 200-300 мм дальше от подвода воздуха и топлива. Это позволяет утонить помол, вероятно уменьшить износ труб водяных экономайзеров и увеличить выход электрофильтовой золы, пригодной для цементной промышленности.

Л и т е р а т у р а

1. Р о о т а м м Р.Э., И й с п у у Л.М., Ф а д е е в В.В., Р а ю р К.Э. Зависимость характеристик готовой пыли сланца от технического состояния пылесистем котлов ТП-67 // См. наст. сб., с. 3.

2. Р о о т а м м Р.Э., И й с п у у Л.М., Р а ю р К.Э. С о л о в е й А.Г. Надежность работы поверхностей нагрева водяных экономайзеров котлов ТП-67 // Тр. Таллиннск. политехн. ин-та. 1985. № 599. С. 61-72.

Über die Untersuchungen des Labormodells
einer Hammermühle mit kleinräumigem
Separator VTI-Eesti Energia

Zusammenfassung

Es werden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen des Modells einer Hammermühle mit kleinräumigem Separator dargelegt. Es wurde bewiesen, daß für die granulometrischen Charakteristiken der Fertigstaub eine besondere Bedeutung der Treffwinkel zwischen Brüdenfluß und Abscheiderwand hat. Es werden einige Vorschläge für die Regelung der durch die Erosion der Hammer bedingte Qualität des Staubs und Verminderung deren Schwankungen dargelegt.

R. Rootamm, L. Õispuu, E. Vürst

Laboratoorse haamerveski ja ÜSI-Eesti Energia
tüüpi väiksegabariidilise separaatori katsetustest

Kokkuvõtte

Artiklis on toodud laboratoorse haamerveski ja väiksegabariidilise separaatori katsetuste tulemused. Näidatakse, et peamiseks konstruktiivse iseloomuga teguriks, mis määrab valmistolmu kvaliteedi, on veskiprodukti ja separaatori tagaseina kohtumisnurk. Esitatakse soovitusi tolmu kvaliteedi reguleerimiseks ja kõikumise vähendamiseks.

UDK 662.62

V. Schwarz

EIN EINFACHES QUALITÄTSKRITERIUM DER KOHLE

Die Bemühungen, eine möglichst große Ausbeute der vorhandenen Kohlevorkommen zu erzielen, bringen es mit sich, daß Kohlesorten von niedriger Qualität gefördert werden, die früher in der Erde gelassen wurden oder in den Abraum kamen. Mit der Verschlechterung der Kohlequalität steigen die Schwierigkeiten bei der Verbrennung, das macht sich besonders bemerkbar bei solchen Feuerungsanlagen, die ursprünglich für bessere Kohle ausgelegt waren.

Die Qualität der Kohle wird oft nur durch die Angabe des Heizwertes charakterisiert, dieser Kennwert ist jedoch nicht ausreichend, um die Schwierigkeiten bei der Verbrennung zu beurteilen. Es ist zwar richtig, daß sich am Fallen des Heizwertes sowohl die Steigerung des Wasser- wie des Ascheballasts beteiligt, aber die alleinige Angabe eines niedrigen Heizwertes sagt nichts aus über den vorwiegenden Einfluß dieses oder jenes Anteils des Ballasts. Außerdem kann der niedrige Heizwert der Kohle auch durch den niedrigen Heizwert ihres brennbaren Anteils bedingt sein, ohne daß ein verhältnismäßig hoher Ballast vorliegt.

Meistens wird die Kohlequalität durch drei Angaben gekennzeichnet

- Wassergehalt der Rohkohle
- Aschegehalt auf Trockensubstanz bezogen
- Heizwert der Rohkohle.

Diese 3 Angaben ermöglichen es zwar, in vollkommener Weise eine Aussage zu machen, wie sich am niedrigen Heizwert der Ballast und der Heizwert des Brennbaren beteiligt (Formel 1, 2), aber ermöglicht es nicht, die Schwierigkeiten

bei der Verfeuerung durch ein einziges Klassifikationskriterium auszudrücken.

$$Q_i^{daf} = \frac{100}{100 - W_t^R - A^R} (Q_i^R + 0,024535 W_t^R) \quad (1)$$

$$A^R = A^d \frac{100 - W_t^R}{100} \quad (2)$$

Randbedingungen für die Bestimmung eines Qualitätskriteriums

Es war gefordert, eine Kennziffer zu finden, die es ermöglicht, besser als der Heizwert qualitativ die Steigerung der Schwierigkeiten auszudrücken, die bei fallender Kohlequalität in Energieanlagen mit Staubfeuerungen entstehen oder zu vergleichen, wie gewisse Maßnahmen und Adaptierungsarbeiten dazu beitragen, die entstandenen Schwierigkeiten zu bewältigen.

Beim Suchen eines passenden Kriteriums werden wir vor allem von den drei Komponenten ausgehen, die sich an dem niedrigen Heizwert der Rohkohle beteiligen: Wasser und Ascheballast, sowie Heizwert der brennbaren Substanz. Jede dieser Komponenten hat einen gesonderten Einfluß auf die Verwertungsmöglichkeit der Kohle für Staubfeuerungen.

In den Begriff Verwertungsmöglichkeit werden wir außer Vorgängen bei der Verbrennung, wie Zündung und Brennstabilität, auch die wichtigsten Einflüsse auf die Kraftwerkskomponenten einbeziehen, die sich als Betriebsschwierigkeiten manifestieren, wie z.B. vergrößerter Verschleiß, Probleme mit der Bewältigung größerer Schlackenmenge oder vergrößerte Flugstaubmengen.

Gleichzeitig war gefordert: das Kriterium solle keine weiteren Laborversuche und Analysen benötigen, die bisher weder in Kraftwerken noch beim Kohleproduzenten routinemäßig durchgeführt werden. Deshalb wurden in das Kriterium die physikalischen Eigenschaften der Rohkohle (Schwierigkeiten beim Transport und in den Kohlebunkern durch übermäßiges Anhaften), sowie die Mahlbarkeit nicht einbezogen. Auch die Neigung zu Verschlackung und Heizflächenverschmutzung wurde

als gleichbleibend angesehen, wobei allerdings eine Steigerung der Schwierigkeiten mit steigendem Aschegehalt angenommen wurde.

Von den einzelnen Komponenten des Ballasts ist der Wassergehalt verhältnismäßig gut zu bewältigen. Er erniedrigt zwar den Heizwert, aber ein Großteil verdampft beim Mahlen und Trocknen der Kohle und kann durch Brüdentrennung oder radikaler, durch Anwendung offener Mahlkreise, abgeführt werden. Die Mühlenleistung ist auch nicht grundlegend beeinflusst. Kohle mit größerem Wassergehalt verlangt zwar eine größere Wärmezufuhr zum Trocknen, aber der geforderte Brennstoffdurchsatz durch die Mühle bleibt erhalten, denn das Wasser verdampft, muß also nicht gemahlen werden.

Zusammenfassend kann man sagen, daß mit bekannten technischen Mitteln der negative Einfluß des erhöhten Wassergehalts eliminiert werden kann.

Im Falle des Ascheballasts gibt es jedoch kein praktisch anwendbares Verfahren, um beim Mahlen und Trocknen die Asche abzuscheiden. Darum kommen die negativen Auswirkungen des erhöhten Aschegehalts voll zur Geltung und vergrößern die Schwierigkeiten bei der Verbrennung. Es tritt eine Zündverzögerung ein, vor allem bei der Staubfeuerung, weil der Ascheballast in der Flamme mit aufgewärmt werden muß. Die Zündverzögerung ist jedoch weiters noch verstärkt, weil die feinsten Kohlepartikel - die für die Zündung am wichtigsten sind - auch den größten Aschegehalt aufweisen. Da die Asche gewissermaßen der Flamme Wärme entzieht, ist die Wärmebilanz der Flamme ungünstig beeinflusst und ihr Temperaturniveau erniedrigt; dadurch ist die Stabilität der Flamme verschlechtert. Ein größerer Aschegehalt bedeutet auch eine größere Schlackenmenge und bei gleicher Neigung der Feuerung und Kohle zu Verschlackungen auch größere Schwierigkeiten.

Abgesehen vom Einfluß des höheren Aschegehalts auf die Verbrennung wirkt er sich schädlich durch höheren Verschleiß der Mahlanlage aus. Es steigen nicht nur die Kosten für die Instandhaltung, es verringert sich auch die Arbeitszeit der Mühlen, weil die Instandhaltarbeiten mehr

Zeit beanspruchen. So entstehen drei Ursachen für die mangelnde Mühlenleistung:

- es muß relativ mehr Kohle vermahlen werden, weil der Heizwert gesunken ist;
- die Mühlenleistung ist objektiv gesunken, weil die aschereichere Kohle allgemein schlechter mahlbar ist;
- der Zeitfond für den Mühlenbetrieb ist verringert, weil die Instandhaltung mehr Zeit in Anspruch nimmt.

Die Behebung der mangelnden Mühlenleistung erfordert technisch sehr anspruchsvolle Rekonstruktionen, nicht nur der Mahlanlage, aber auch der Brenner. Im Grenzfall ist es sogar nötig, die Mühlen gegen eine größere Type auszutauschen, wenn genug Raum vorhanden ist. Die aschenreichere Kohle fordert auch mehr Mahlarbeit, weil die Asche mit der Kohle zerkleinert werden muß.

Ein größerer Verschleiß der Heizflächen muß in Kauf genommen werden, da praktisch kaum eine Querschnittvergrößerung zur Verringerung der Rauchgasgeschwindigkeit durchgeführt werden kann. Die Folgeerscheinung sind erhöhte Kosten und Zeiten für die Instandhaltung und kürzere Reisezeiten des Dampferzeugers.

Sehr aufwendig und zeitraubend ist die Rekonstruktion oder der Austausch der elektrischen Staubabscheider. In ungünstigen Fällen ist der Austausch unumgänglich, um die Reinhaltung der Luft zu gewährleisten.

Es müssen neue Grundstücke für die Deponierung der Asche gefunden werden, weil die bestehenden schneller ausgefüllt werden.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit kann man auf diese Weise die negativen Auswirkungen des erhöhten Ascheballasts in groben Umrissen charakterisieren.

Definierung des Qualitätskriteriums und Beschreibung des Nomogramms

Um bei der Bewertung der Kohle den dominierenden Einfluß des Ascheballasts hervorzuheben, hat der Autor ein Qualitätskriterium vorgeschlagen, das von den tschechischen Energiebetrieben mit der Arbeitsbezeichnung Schwarzes Krite-

terium schon in die technische Praxis eingeführt wurde. Das Sch-Kriterium ist folgendermaßen definiert:

$$\text{Sch} = \frac{10 A^d}{Q_i^d} \quad (3)$$

Dieses Kriterium, das nur aus Kennwerten der wasserfreien Substanz aufgebaut ist, betont den Einfluß der Asche und unterdrückt den des Wassers. Je größer der Zahlenwert des Kriteriums ist, umso größer sind die Schwierigkeiten bei der Verwertung solcher Kohle, vor allem in Staubfeuerungen; $\text{Sch} = 50 \text{g MJ}^{-1}$ dürfte einen Grenzwert für Braunkohle darstellen.

Höhere Werte des Sch-Kriteriums erfordern eine andere Verbrennungstechnologie z.B. das Wirbelschicht-Verfahren.

Für die schnelle Bestimmung des Sch-Kriteriums hat der Autor ein Nomogramm (Bild 1) entwickelt, das unter anderem günstig zur übersichtlichen Darstellung einer Gesamtheit von Kennwerten dienen kann.

Im oberen Teil des Nomogramms sind mit den Koordinaten Q_i^d und A^d zwei Gleichungen dargestellt (4), (5).

$$A^d = \frac{\text{Sch}}{10} \cdot Q_i^d \quad (4)$$

Für $\text{Sch} = \text{const}$ als Parameter erhält man ein Bündel von Geraden, die vom Ursprung des Koordinatensystems ausgehen.

$$\frac{100 - A^d}{100} = \frac{1}{Q_{i \text{ daf}}^d} \cdot Q_i^d \quad (5)$$

Auch diese Gleichung wird linear, wenn $Q_{i \text{ daf}}^d$ zum Parameter gewählt wird. Das Strahlenbündel geht vom Punkt $Q_i^d = 0, A^d = 100$ aus.

Der untere Teil des Nomogramms dient der grafischen Bestimmung des Heizwertes der wasserfreien Substanz aus Heizwert der Rohkohle und Wassergehalt nach der Gleichung:

$$Q_i^r = Q_i^d \frac{100 - w_t^r}{100} - 0,024535 w_t^r \quad (6)$$

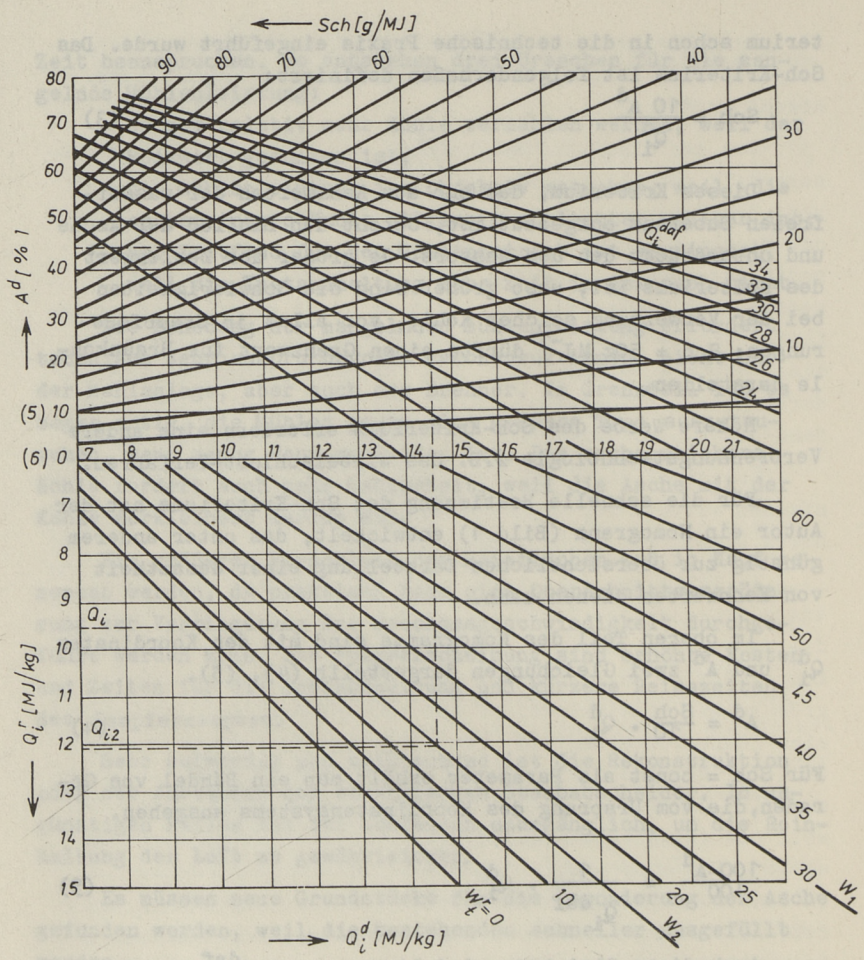


Bild 1. Nomogramm für die Bestimmung des Sch-Kriteriums.

- A^d % - Aschegehalt wasserfrei,
- A^r % - Aschegehalt der Rohkohle,
- Q_i^{daf} $MJ\ kg^{-1}$ - Heizwert der brennbaren Substanz,
- Q_i^d $MJ\ kg^{-1}$ - Heizwert wasserfrei,
- Q_i^r $MJ\ kg^{-1}$ - Heizwert der Rohkohle,
- Sch $g\ MJ^{-1}$ - Kriterium der Verwertungsmöglichkeit,
- W_t^r % - Wassergehalt der Rohkohle,
- $W_1 W_2$ % - Wassergehalt im Zustand 1,2.

Im Koordinatensystem Q_i^d Q_i^r mit $W_t^r = \text{const}$ als Parameter läßt sich die lineare Gleichung (6) als ein Bündel von Geraden darstellen, die nicht von einem Punkt ausgehen. Das Nomogramm ermöglicht weiters das Ablesen des Heizwertes beim Übergang vom Wassergehalt W_t^r auf W_1 bzw. von W_1 auf W_2 .

Das Gesamtnomogramm gestattet es, grafisch einen der vier Kennwerte aufzusuchen, wenn die restlichen drei gegeben sind, wie es die Tabelle zeigt:

Das Nomogramm ist so aufgebaut, daß zwei Kennwerte A^d , Q_i^{daf} im oberen Teil und zwei W_t^r , Q_i^r im unteren Teil einen Schnittpunkt ergeben. Liegt der fehlende Kennwert im oberen Teil der Tabelle (Spalte 1 2), sucht man zuerst den Schnittpunkt im unteren Teil des Nomogramms; für Spalte 3 4 ist der Vorgang umgekehrt.

Nomogramm	Spalte	1	2	3	4
oberer Teil	A^d	X	G	G	G
	Q_i^{daf}	G	X	G	G
unterer Teil	W_t^r	G	G	X	G
	Q_i^r	G	G	G	X

Es bedeutet:

- G - gegebener Kennwert
- X - gesuchter Kennwert

Das Nomogramm kann vorteilhaft für Brennstoffprognosen auf Grund statistischer Angaben angewendet werden. Eine Gesamtheit von Kennzahlen eines Brennstoffs bestimmter Herkunft in das Nomogramm eingetragen, gibt Aufschluß über das Ausmaß der Variabilität der einzelnen Kennwerte, vor allem des Heizwertes der brennbaren Substanz - Q_i^{daf} . Werden die prognostischen Werte W_t^r , A^d , Q_i^r ins Nomogramm eingetragen, so kann übersichtlich kontrolliert werden, ob der resultierende Wert von Q_i^{daf} im Einklang mit der statistischen Gesamtheit der bisher erfaßten Werte ist, oder ob die Extrapolation mit dem wahrscheinlichen Trend zusammenfällt.

Parameeter söe kvaliteedi lihtsustatud
hindamiseks

Kokkuvõte

Energeetiliste tahkekütuste kvaliteedi hindamiseks määratavate parameetrite (kütteväärtuse, niiskuse ja tuhasisalduse) mõju analüüsi alusel esitatakse uus kütust iseloomustav parameeter - Schwarzi kriteerium. See kriteerium võimaldab ilma täiendavate laboratoorsete uuringuteta prognoosida põlemisprotsessi kulgu ja kütuse mineraalosa mõju soojusvahetuspinde tööle. Schwarzi kriteeriumi on juba kasutatud Tšehhoslovakkia energeetikute inseneriarvutustes.

УДК 621.182

А.А. Отс, Р.Э. Рандманн, Т.Н. Сууркууск,

А.Э. Сийрде, Я.Б. Абрам

ВЛИЯНИЕ ПОЛУПИКОВОГО РЕЖИМА НА УСЛОВИЯ РАБОТЫ
ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ ПЫЛЕСЛАНЦЕВОГО КОТЛА

Повышение доли атомных электростанций в энергосистеме северо-запада СССР в последние десятилетия привело к изменению графика нагрузки тепловых электростанций системы. Агрегаты Прибалтийской и Эстонской ГРЭС, которые до ввода в эксплуатацию Ленинградской АЭС работали, в основном, в базисном режиме с незначительными разгрузками в ночные часы и выходные дни переводились на покрытие полупиковой нагрузки. График работы агрегатов этих станций в настоящее время характеризуется разгрузками в ночные часы и регулярными остановами в горячий резерв на выходные дни. В настоящее время остановы в горячий резерв обычно производят 1-2 раза в месяц. Так как в будущем ожидается углубление ориентации этих электростанций на покрытие пиковой части графика нагрузки энергосистемы, возникла необходимость исследовать влияние такого режима работы на работу основного оборудования ТЭС. Из основного оборудования ТЭС наиболее чувствительными к изменениям режима работы являются котлы.

Котлы Прибалтийской и Эстонской ГРЭС работают на эстонских горючих сланцах, которые известны как высокосольное топливо со сложным составом минеральной части, вызывающее при пылевидном сжигании интенсивное загрязнение поверхностей нагрева котла [1]. Безостановочная работа котлов в более длительный период времени может быть обеспечена только с применением средств очистки поверхностей нагрева от золовых отложений "на ходу", т.е. без остановки котла. Однако, как показывают исследования, применение эффективных средств очистки вызывает ускорение износа и усталости металла поверхностей нагрева и в итоге снижение надежности

работы котла [2, 3]. Так как вредное на металл воздействие средств очистки возрастает с увеличением частоты их применения, с точки зрения надежности котла целесообразно довести частоту применения очистки до минимума. С другой стороны, минимальная частота применения средств периодической очистки поверхностей нагрева определяется надобностью обеспечить определенное тепловосприятие поверхностей нагрева или, что то же самое, темпом их загрязнения. Так как итоговый темп загрязнения поверхностей нагрева наряду с другими факторами зависит от режима работы котла, то особый интерес представляет вопрос влияния полупикового режима котла на характер загрязнения поверхностей нагрева.

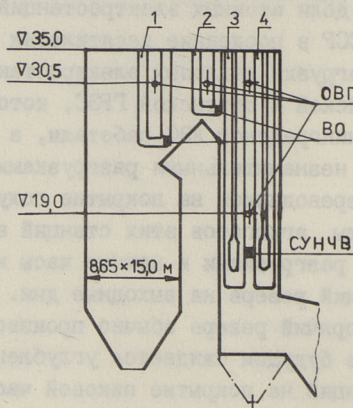


Рис. 1. Схема котла ТП-101 и расположения очистительных устройств.

1 - топочные ширмы; 2 - промежуточные ширмы;
3 - длинные ширмы первичного пароперегревателя,
4 - ширмы вторичного пароперегревателя. ОВГ -
аппараты водяной очистки; ВО - виброочистка;
СУНЧВ - система уравновешенного низкочастотного
встряхивания.

Экспериментальная часть настоящей работы проводилась на котле ТП-101 Эстонской ГРЭС. Котел ТП-101 барабанный с промперегревом пара имеет многоходовую компоновку (рис. 1). Паропроизводительность котла 89 кг/с и параметры пара 13,8/2,2 МПа. Пароперегреватели котла выполнены, в основном, ширмовыми и расположены в горизонтальном газоходе за топкой (топочные - и промежуточные ширмы высокого давления) и в опускном газоходе (выходная ступень пароперегревателя)

высокого давления и пароперегреватель низкого давления). В опускной шахте ширмы в большой степени продольно обтекаемые.

Пароперегреватели котла ТП-101 были оснащены системой комбинированной очистки, заключающейся в переменном применении виброочистки или СУНЧВ (система уравновешенного низкочастотного встряхивания) на длинных ширмах и водяной очистки. Виброочистка выполнялась при помощи стандартных вибраторов направленного действия с периодом включения 2 ч. (период включения СУНЧВ тоже 2 ч.), а водяная очистка с глубоководными аппаратами типа ОВГ с холодной технической водой в среднем через 7 дней.

Режимы работы ширмовых поверхностей пароперегревателя приведены в таблице I.

Т а б л и ц а I

Параметр	Топочные ширмы	Промежуточные ширмы	Длинные ширмы опускного газотока
Температура поверхности нагрева	400-500 °C	420-500 °C	430-620 °C
Температура дымовых газов	1170-1230 °C	1050-1200 °C	700-1050 °C
Скорость дымовых газов	5,5 м/с	5,5 м/с	6,5 м/с

Загрязненность золовыми отложениями пароперегревателей наиболее наглядно характеризуется приведенным тепловым сопротивлением отложений. На рис. 2° приведена характерная зависимость теплового сопротивления отложений при работе пароперегревателя в условиях виброочистки с СУНЧВ от времени. Моменту времени $\tau = 0$ отвечает окончание цикла водяной обмывки. Во время опытов котел работал с нагрузкой 85 кг/с. Как видно, виброочистка и СУНЧВ допускают постоянный прирост теплового сопротивления отложений, с которым сопровождается постоянное снижение удельного тепловосприятия поверхности нагрева. При длительной работе котла (базисный режим) непременно наступает момент, когда тепловосприятие пароперегревателей котла окажется недостаточ-

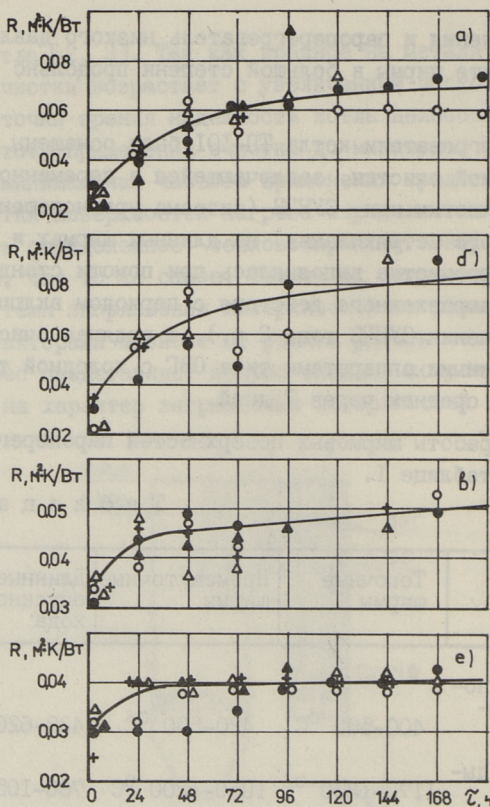


Рис. 2. Изменение теплового сопротивления ширмового пароперегревателя котла ТП-101 в межбудучном периоде: а - топочные ширмы; б - промежуточные ширмы; в - длинные ширмы первичного пароперегревателя; г - вторичный пароперегреватель. Обозначения точек показывают отдельные опыты.

ным для обеспечения перегрева пара. При комбинированной очистке теперь выполняют водяную очистку, в ходе которой с поверхности нагрева удаляется большая часть неудаляемых виброочисткой отложений и цикл начинается заново. С точки зрения надежности работы котла желательно проводить водяную очистку как можно реже, так как она вызывает ускорение коррозионного износа металла трубочистаемой поверхности [3].

При работе котла в полупиковом режиме с частыми периодическими остановами в горячий резерв на 20-40 часов механизм загрязнения пароперегревателей качественно изменяется. При останове раскаленные отложения на поверхностях на-

грева расхолаживаются, в них возникают разрушающие термические напряжения и значительная часть более рыхлых отложений самопроизвольно обрушивается с поверхности нагрева, т.е. происходит самоочистка. На рис. 3 представлено характерное изменение теплового сопротивления отложений у разных ступеней пароперегревателя котла ТП-101 при останове блока в горячий резерв на 20 часов. Как видно из представленных данных, во время останова котла наиболее ощутимая самоочистка происходит у топочных и промежуточных ширм, где тепловое сопротивление отложений снижается на 45 % от своего исходного (до останова) значения, если для всех ступеней пароперегревателя, в среднем, соответствующее снижение лишь 25 %. Также видно, что чем больше тепловое сопротивление до останова котла в горячий резерв, тем больше уменьшение теплового сопротивления ΔR . Это можно объяснить более высокими термическими напряжениями, возникшими в более толстых отложениях при остывании слоя отложений во время останова.

Сравнивая изменения теплового сопротивления отложений на разных ступенях пароперегревателя, имеющие место во время останова котла в резерв с соответствующими среднестатистическими значениями, можно сделать вывод, что наиболее значительное уменьшение теплового сопротивления отложений происходит у топочных и промежуточных ширм, где оно снижается на 45 % от своего исходного значения, если для всех ступеней пароперегревателя, в среднем, соответствующее снижение лишь 25 %. Также видно, что чем больше тепловое сопротивление до останова котла в горячий резерв, тем больше уменьшение теплового сопротивления ΔR . Это можно объяснить более высокими термическими напряжениями, возникшими в более толстых отложениях при остывании слоя отложений во время останова.

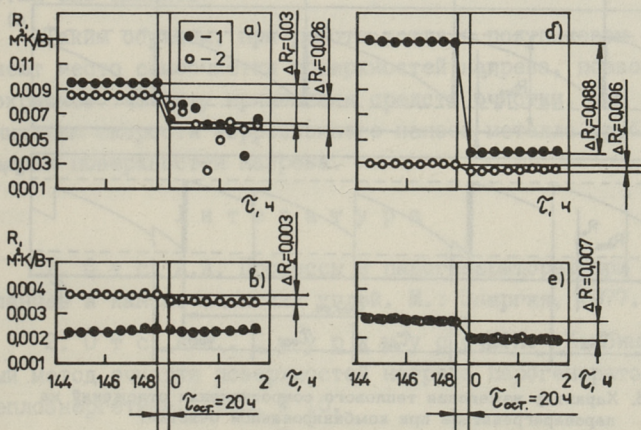


Рис. 3. Изменение теплового сопротивления отложений пароперегревателя котла ТП-101 во время останова на 20 часов в горячий резерв:

1 - опыт на котле 5А; 2 - опыт на котле 5Б. Обозначения см. рис. 2.

статистическими изменениями в цикле водяной очистки "на ходу" увидим, что первые меньше (рис. 4). По эффективности удаления отложений самоочистка во время останова уступает водяной очистке в среднем в 2 раза.

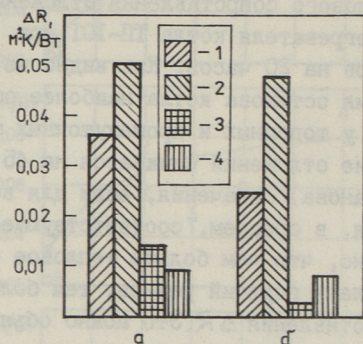


Рис. 4. Уменьшение теплового сопротивления отложений пароперегревателя пылесланцевого котла ТП-101 при водяной обмывке (а) и при самоочистке во время останова на горячий резерв (б).
 1 - топочные ширмы; 2 - промежуточные ширмы;
 3 - длинные ширмы первичного пароперегревателя;
 4 - вторичный пароперегреватель.

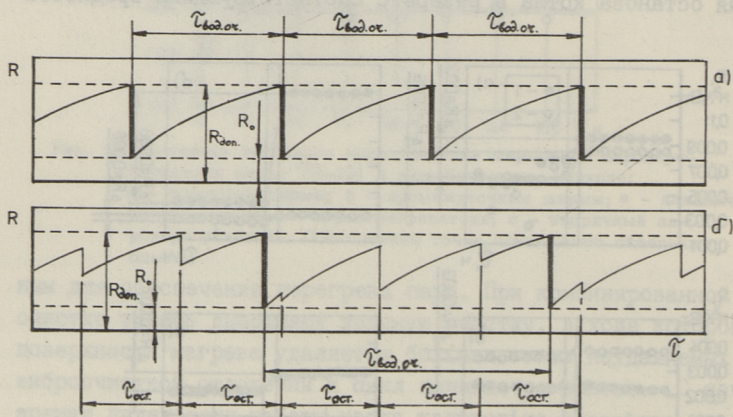


Рис. 5. Характер изменения теплового сопротивления отложений на пароперегревателе при комбинированной очистке:
 а - работа в базисном режиме. $R_{\text{дон}}$ - максимально допустимое тепловое сопротивление отложений; $R_{\text{о}}$ - то же непосредственно после цикла водяной очистки; $\tau_{\text{вод.оч.}}$ - период водяных очисток; $\tau_{\text{ост.}}$ - период остановов котла в горячий резерв, τ - время.

Изменение с переходом котла с базисного режима работы на полупиковый режим из-за снижения теплового сопротивления зольных отложений на пароперегревателе позволяет сократить частоту применения водяной очистки при их комбинированной очистке. Периодические водяные очистки заменяются частично периодическими самоочистками при останове котла в резерв. Особенно заметным будет сокращение, если период остановов котла в резерв меньше периода применения водяной очистки при работе котла без остановов. Сказанное принципиально видно на рис. 5, где представлен характер изменения теплового сопротивления отложений во времени при работе котла в базисном режиме (комбинированная очистка) и в полупиковом режиме.

Если котел в полупиковом режиме будет работать наряду с еженедельными остановами в резерв в выходные дни и с глубокими разгрузками в ночные часы, то в результате сокращения среднеексплуатационной нагрузки ожидается также некоторое снижение темпа накопления неудаляемых при использовании виброочистки отложений в периодах между самоочистками и водяными обмывками. Сказанное позволяет прогнозировать, что частоту водяных очисток можно при таком режиме работы котла еще снизить.

Таким образом, при работе котла в полупиковом режиме имеют место самоочистки поверхностей нагрева, позволяющие сокращать частоту применения средств очистки, что ведет к снижению скорости коррозионного износа металла труб с очищаемых поверхностей нагрева.

Л и т е р а т у р а

1. О т с А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей. М.: Энергия, 1977. 312 с.

2. О т с А.А., Сууркууск Т.Н. Комбинированный метод очистки поверхностей нагрева парогенераторов // Теплоэнергетика, 1976, № 10.

3. О т с А.А., Сууркууск Т.Н., Таллермо Х.И. Влияние очистки поверхностей нагрева паровых котлов на износ металла // Теплоэнергетика, 1980, № 1, С. 37-41.

Einfluß der Halbspitzenleistungen des ölschieferge-
feuerten Dampferzeugers für die Arbeits-
bedingungen des Dampfüberhitzers

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden Ergebnisse der Selbstreinigung des Dampfüberhitzers behandelt, wenn der Kessel für 20-40 Stunden in heißer Reserve stehen bleibt. Es wird auch auf die Möglichkeiten hingewiesen, wie man diese Reservepausen für die Verminderung der Korrosionsgeschwindigkeit zielstrebig ausnutzen kann.

A. Ots, R. Randmann, T. Suurkuusk,
A. Siirde, J. Abram

Pooltippkoormuse mõju põlevkivikatla auruüle-
kuumendi tööttingimustele

Kokkuvõte

Artiklis käsitletakse tolmipõlevkivikatla TP-101 auru-
ülekuumendi isepuhastumist katla jätmisel 20-40 tunniks kuu-
ma reservi. Tutvustatakse võimalust ülekuumendi küttepindade
tööea pikendamiseks nende seisakute oskuslikul kasutamisel.

И.Р. Микк, Т.М. Лаусмаа, Т.Б. Тийкма

К РАСЧЕТУ ШИРМ, РАЗМЕЩЕННЫХ В ТОПКУ ПАРОВОГО КОТЛА

Настоящее исследование проведено в рамках уточнения нормативного метода теплового расчета топок паровых котлов. Более точным методом расчета топок, особенно при наличии в них ширм, является зональный метод. Однако из-за нехватки исходных данных по теплообмену и горению по отдельным зонам топки в настоящее время следует ограничиваться уточнением некоторых параметров суммарного расчета топки.

В настоящей работе анализированы некоторые аспекты определения эффективной длины пути луча в топке при наличии в ней ширм, а также неравномерности освещенности ширм и прилегающих к ним частей экранов. При этом внимание уделено на уточнение расчета ширм по нормативному методу [1] и расширению возможностей применения ЭВМ для этих расчетов.

При наличии ширм в топочном пространстве средняя длина пути луча S излучающего объем относительно какой-то поверхности заметно зависит от конкретной величины поверхности ширм и их конфигурации, а также от их расположения в топке.

Для сложной системы целесообразно определить S методом Монте-Карло, по которому из каждой произвольной точки поверхности испускается несколько лучей в произвольном направлении и измеряется их длина до пересечения с первым встречающимся ограждением на пути луча. Найденная таким образом длина является длиной свободного пробега луча. Средняя длина луча данной поверхности при этом определяется как арифметическая средняя длин всех лучей, испущенных от данной поверхности. Общее число статистических испытаний для одной поверхности в настоящей работе составляет 10000.

Среднюю длину луча для всей топки определяли как взвешенную среднюю по составляющим поверхности нагрева топки:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n l_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i}, \quad (1)$$

где l_i - средняя длина луча i -й поверхности;
 F_i - площадь i -й поверхности.

Результаты расчета длин лучей для пустых объемов по данной методике сравнивали с результатами расчета по общеизвестной формуле $s = 4V/F$ (см. табл. I).

Т а б л и ц а I

Сравнение результатов вычисления s различными методами

Тип объема	$4 \frac{V}{F}$	Метод Монте-Карло	Разность %
Единичный кубик	0,6666	0,6978	4,67
Топка размерами 30x10x5 м	6	5,869	2,20

Вышеописанной методикой, которую считали образцовой, проверяли среднюю длину луча, определенную по формуле (2), которая известна из [1] под номером (6-056):

$$s = \frac{3,6 V_T}{F_{cb\delta} + F_{np} + F_{\omega}} \left(1 + \frac{F_{\omega}}{F_{cb\delta} + F_{np}} \frac{V_{cb\delta}}{V_T} \right), \quad (2)$$

где V_T - объем топки;
 F_{ω} - поверхность ширм;
 $F_{cb\delta}$ - поверхность топки, свободной от ширм;
 F_{np} - поверхность экранов, прилегающих к ширмам;
 $V_{cb\delta}$ - объем топки, свободной от ширм.

Рассмотрены топки размерами 10x5x30 м и 10x10x30 м (размеры приведены в порядке: ширина фронта, ширина боковых стен, высота). Ширмы расположены параллельно с боковыми стенками топки. Рассмотрены 3 варианта с количеством ширм по фронтальной стенке топки 1, 3 и 9. Каждый вариант содержит подварианты, отличающиеся по ширине и высоте ширм.

Сопоставление длины пути луча, определенного с применением метода Монте-Карло, с длиной пути луча, определенного по формуле (2) показывает, что последняя дает заметно завышенное значение s . Если в этой формуле опустить часть,

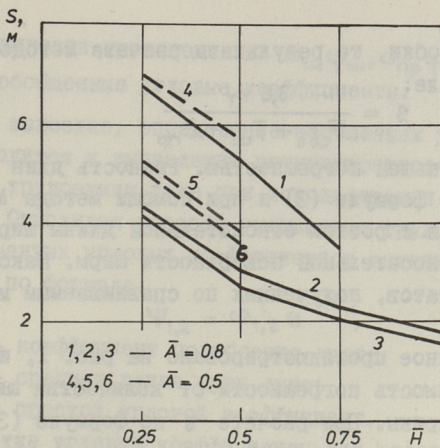


Рис. 1. Средняя длина луча в топке в зависимости от относительной высоты \bar{H} и ширины \bar{A} ширм при различных методах расчета. По ширине топки расположено 9 ширм. Размеры топки $10 \times 10 \times 30$ м.
1, 4 - по [1], 2, 5 - по формуле (3), 3, 6 - по методу Монте-Карло.

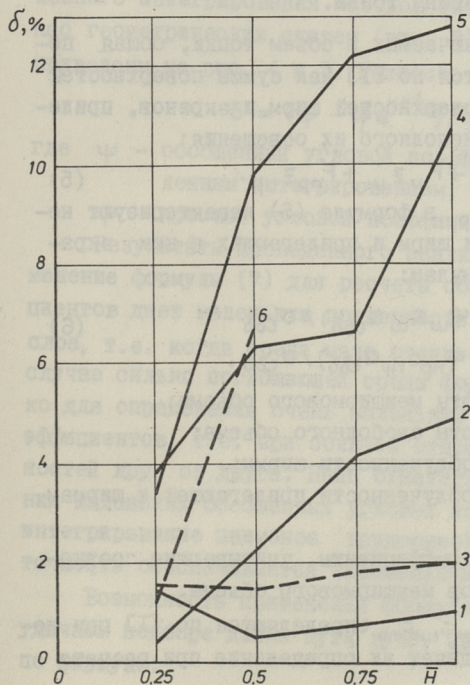


Рис. 2. Разность в длинах лучей в топке, рассчитанных по методу Монте-Карло и по формуле (3):
1-4 - топка сечением 10×5 м, количество ширм на стороне 10 м; 1 - 2 ширма шириной 2 м, 2 - 3 ширмы шириной 1 м, 3 - 9 ширм шириной 1 м, 4 - 9 ширм шириной 2 м, 5, 6 - топка сечением 10×10 м, количество ширм: 5 - 9 ширм шириной 4 м, 6 - 9 ширм шириной 2.5 м.

заклученную в скобки, то результаты расчета методом Монте-Карло и по формуле:

$$s = \frac{3,6 V_T}{F_{сб\delta} + F_{ш} + F_{нр}} \quad (3)$$

согласуются с меньшей погрешностью. Разность длин пути луча, найденных по формуле (3) и при помощи метода Монте-Карло, увеличивается с ростом относительной длины ширм, т.е. с увеличением относительной поверхности ширм. Максимальная разность результатов, полученных по сравниваемым методикам, составляет 12 %.

Вышеизложенное проиллюстрировано на рис. 1, и на рис. 2 приведена зависимость погрешности от количества ширм и их относительной ширины. При расчете s по формуле (3), определенной как:

$$\delta = (s_M - s) / s_M \cdot 100\%, \quad (4)$$

где s_M - средняя длина луча в топке по методу Монте-Карло;
 s - средняя длина луча по формуле (3).

Под относительной шириной ширмы (\bar{A}) здесь понимается отношение размера A на ширину топки.

При наличии ширм, включаемых в объем топки, общая поверхность стен, определяется по [1] как сумма поверхностей стен свободного объема, поверхностей ширм и экранов, прилегающих к ширмам с учетом неполного их освещения:

$$F_{ст} = F_{сб\delta} + F_{ш} z_{ш} + F_{нр} z_{нр}. \quad (5)$$

Коэффициенты $z_{ш}$, $z_{нр}$ в формуле (5) характеризуют неравномерность освещенности ширм и прилегающих к ним экранов и определяются по формулам:

$$z_{ш} = (a_{мш} + \varphi_{ш} c_{ш} a_{сб\delta}) / a_{сб\delta} \quad (6)$$

$$z_{нр} = (a_{мш} + \varphi_{нр} c_{нр} a_{сб\delta}) / a_{сб\delta}.$$

где $a_{мш}$ - степень черноты межширмового объема;

$a_{сб\delta}$ - степень черноты свободного объема;

$\varphi_{ш}$ - коэффициент облученности ширмы;

$\varphi_{нр}$ - коэффициент облученности прилегающей к ширмам части экрана;

$c_{ш}$, $c_{нр}$ - поправочные коэффициенты, учитывающие соотношения размеров межширмового объема.

Коэффициенты $\varphi_{ш}$, $\varphi_{нр}$, $c_{ш}$, $c_{нр}$ определяются по [1] при помощи номограмм, что затрудняет их определение при расчете топки на ЭВМ.

В сущности произведения $C_{ш} \varphi_{ш}, C_{пр} \varphi_{пр}$ представляют из себя обобщенные угловые коэффициенты.

Как известно, определение обобщенных угловых коэффициентов сводится к вычислению четырехкратного интеграла, что является трудоемким даже при использовании быстродействующих ЭВМ. Отыскивая способы уменьшения трудоемкости нахождения обобщенных угловых коэффициентов выдвинута идея их вычисления по формуле:

$$\psi_{1,2} = \varphi_{1,2} e^{-k l_k}, \quad (7)$$

где k - коэффициент ослабления луча;

l_k - средняя длина пути луча;

$\varphi_{1,2}$ - простой угловой коэффициент.

Простые угловые коэффициенты для простых геометрических систем можно вычислять по аналитическим формулам [2].

Возможность применения формулы (7) оценена сравнением полученных результатов с результатами точного вычисления соответствующих обобщенных угловых коэффициентов путем численного интегрирования методом Симпсона. Для интересующих нас геометрических систем (рис. 3) результаты сравнения приведены на рис. 4 и 5. Разность значений определена как

$$\delta = (\psi - \varphi e^{-k l_k}) / \psi \cdot 100\%, \quad (8)$$

где ψ - обобщенный угловой коэффициент, определенный численным интегрированием;

φ - простой угловой коэффициент.

Результаты проведенного анализа показывают, что применение формулы (7) для расчета обобщенных угловых коэффициентов дает маленькую погрешность при оптически тонком слое, т.е. когда среда мало отличается от прозрачной. В случае сильно поглощающей среды формула (7) применима только для определения очень маленьких обобщенных угловых коэффициентов, т.е. при большом относительном удалении поверхностей друг от друга. Надо отметить, что в случае определения маленьких обобщенных угловых коэффициентов численное интегрирование наименее трудоемкое, поскольку достаточная точность обеспечивается минимальным числом разбиений.

Возможность применения формулы (7) расширяется при удачном подборе длины пути луча, которую можно определить по формуле:

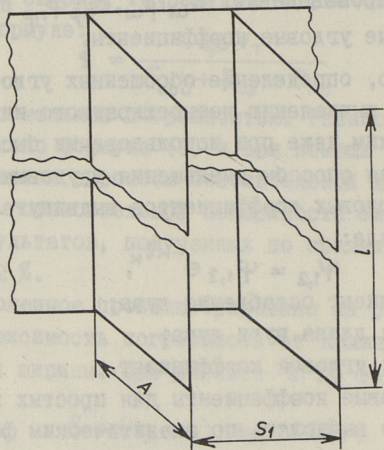


Рис. 3. Обозначение геометрических размеров ширм, расположенных в топке.

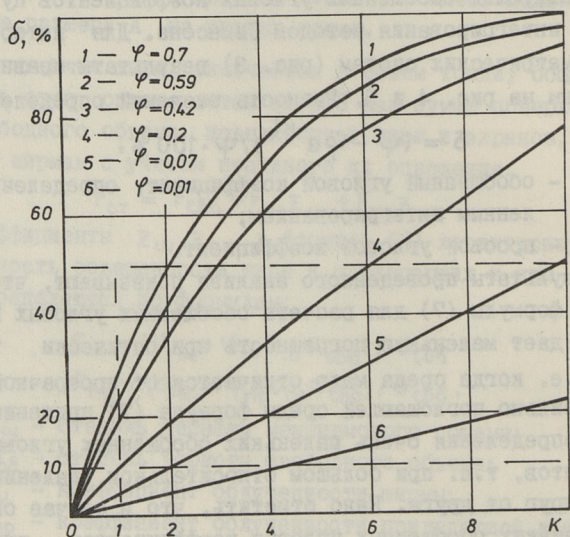


Рис. 4. Погрешность определения обобщенных угловых коэффициентов между выходным окном и прилегающей к ширмам части экрана, вычисленных по формуле (7) для случая $l = S_1$, при изменяющейся ширине ширмы A (указаны соответствующие простые угловые коэффициенты).

$$\chi = (\ln \psi_{1,2} - \ln \varphi_{1,2}) / \kappa, \quad (9)$$

выведенной из (7) при вычисленных численным интегрированием значений $\psi_{1,2}$ для наиболее часто встречающихся геометрических размеров ℓ, A, s_1 (см. рис. 3).

Расчет по формуле (9) показывает, что средняя длина пути луча для прилегающих к ширмам экранов близка к размеру глубины ширмы A . Зависимость χ от оптической толщины среды сравнительно слабая и ее можно задавать линейной зависимостью. Хуже совпадение средней длины пути луча для ширмовой поверхности, но с умеренной погрешностью можно для этого случая также найти аппроксимационную формулу.

Вышеприведенное подтверждает возможность вычислять коэффициенты Z_{ω} и Z_{np} несложными аналитическими формулами. Умеренная погрешность при этом мало влияет на конечный результат, т.к. формулы для расчета Z_{ω} и Z_{np} (6) состоят из двух слагаемых, из которых степени черноты соответствующих объемов играют более значительную роль. В итоге данного анализа предлагается определить коэффициенты неравномерности освещенности ширм и прилегающих к ним экранов следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\omega} &= (a_{нш} + \varphi_{\omega} a_{св\delta}) / a_{св\delta} \\ Z_{np} &= (a_{нш} + \varphi_{np} a_{св\delta}) / a_{св\delta} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где $\varphi_{\omega} = \frac{0,56}{1 + \frac{s_1}{\ell}} \left[1 + \frac{s_1}{A} - \sqrt{\left(\frac{s_1}{A}\right)^2 + 1} \right] e^{-s_1 \kappa \left[\ln\left(\frac{A}{s_1}\right) + 0,2 \right]}$

$$\varphi_{np} = \frac{e^{-1,08 A \kappa}}{1 + 1,7 \frac{s_1}{\ell}} \left[\sqrt{\left(\frac{A}{s_1}\right)^2 + 1} - \frac{A}{s_1} \right].$$

Структура формул для расчета φ_{ω} и φ_{np} состоит из произведений трех составляющих, первое из которых учитывает конечную высоту ширм (размер ℓ), второе — формула для определения соответствующего простого углового коэффициента для случая $\ell \rightarrow \infty$ [2] и третье — учитывает поглощение излучения в среде. Поправки на конечную длину ширмы позволяют отказаться от использования соответствующих точных формул для конечных поверхностей [2], которые слишком сложны для инженерных расчетов. Предлагаемое представление простого углового коэффициента позволяет для реальных размеров ширм вычислять его с погрешностью не хуже 5%.

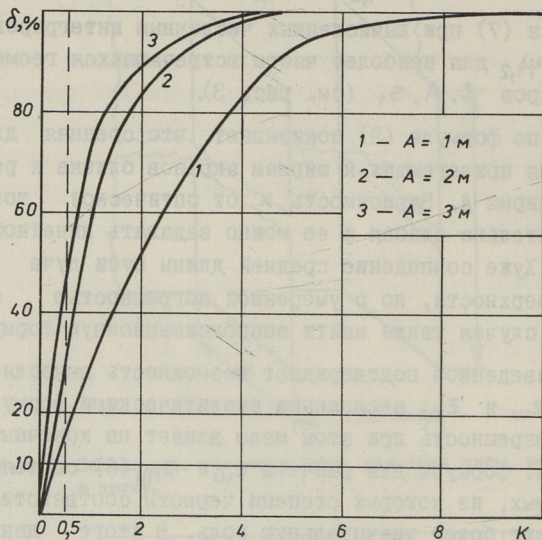


Рис. 5. Погрешность определения обобщенных угловых коэффициентов между ширмой и выходным окном, вычисленных по формуле (7) для случая $A = s_1 = l$.

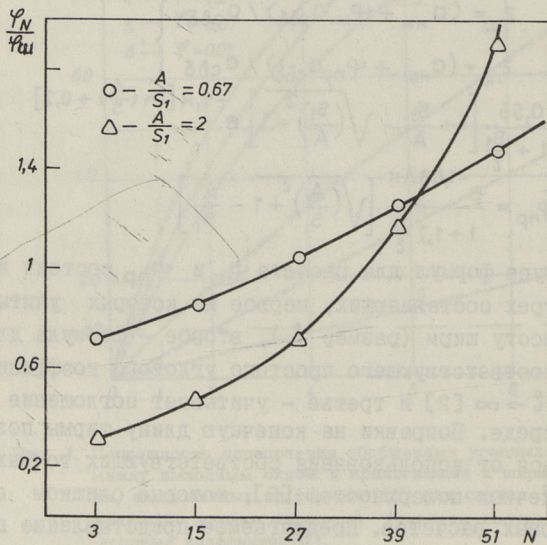


Рис. 6. Относительная освещенность одиночной трубы в ширме (N - порядковый номер трубы, считая от экрана).

Определенный интерес представляет распределение освещенности по отдельным трубам ширмы и прилегающих к ней экранов. С использованием вышеописанного математического аппарата найдены зависимости для относительной освещенности труб ширмы в зависимости от их местонахождения в ширме и оптической толщины среды межширмового объема.

Неравномерность освещенности одиночных экранных труб, прилегающих к ширмам, не является таким резким в зависимости от их расположения. Для некоторых случаев вышеупомянутые сведения иллюстрируются графиками на рис. 6.

Для расчета относительной освещенности одиночной трубы в ширме найдена следующая формула:

$$\frac{\varphi_N}{\varphi_{ш}} = e^{a_0 + a_1 N}, \quad (10)$$

где

$$a_0 = -0,6 - 0,2 \frac{A}{S_1} - 1,7 k;$$
$$a_1 = 0,01 + 0,014 \frac{A}{S_1} + 0,04 k;$$

N - номер трубы в ширме диаметром 30-40 мм (нумерация труб начинается со стороны экрана).

В результате данного исследования уточненная формула для расчета эффективного пути луча для топки, где расположены ширмы. Также получены аналитические зависимости для расчета коэффициентов неравномерности освещенности ширм и прилегающих к ним экранов. Получена формула для определения относительной освещенности одиночной трубы в ширме, по которой можно оценить условия работы отдельных труб в ширме в зависимости от их местонахождения в ширме.

Л и т е р а т у р а

1. Тепловой расчет котельных агрегатов: Нормативный метод. М.: Энергия, 1973. 296 с.

2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.

I. Mikk, T. Lausmaa, T. Tiikma

Aurukatla koldesse paigutatud sirmide arvutamisest

Kokkuvõte

Autukatla koldesse paigutatud sirmidest koosnevat geometrilist süsteemi analüüsiti Monte-Carlo meetodil. Selle tulemusena täpsustati kolde efektiivse kiirgava kihi paksuse valemit. Leiti analüütilised seosed sirmidele ja nendega külgnevatele ekraanidele langeva kiirguse ebaühtlustegurite arvutamiseks. Tuletati valem sirmis paikneva üksiku toru suhtelise kiirgusvastuvõtu arvutamiseks. Nimetatud valem võimaldab hinnata üksiku toru soojuslikku tööd vastavalt tema paiknemise asukohast sirmis.

I. Mikk, T. Lausmaa, T. Tiikma

The Design of the Platen Screens Mounted
into the Boiler Furnace

Abstract

The Monte-Carlo method was applied to find a more exact formula for the effective mean beam length in boiler furnace with mounted platen screens. The lighting ununiformity of the platen screens and wall screens nearby them by radiation from the furnace is described analytically. A formula for the relative lighting of the single tube in the platen screen has been derived.

Х.А. Кяар, Т.Б. Тийкма, В.А. Варес

ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНВЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ СЫПУЧИХ ОТЛОЖЕНИЙОсобенности гидродинамики в парогенераторе
с гелиевым теплоносителем

В парогенераторах с гелиевым теплоносителем поток горячего газа ($t = 800^\circ\text{C}$) содержит графитовые частицы, из которых на змеевиковых поверхностях теплообмена формируются отложения. Дополнительное кондуктивное термическое сопротивление слоя отложений снижает коэффициент теплопередачи между теплоносителями и тем самым тепловую эффективность парогенератора.

К настоящему времени выполнен целый ряд теоретических и экспериментальных исследований по теплообмену газовых теплоносителей, содержащих графитовые частицы [1-10]. Образование графитовых отложений наблюдается только при охлаждении газового потока и это концентрирует внимание на роль термофоретических сил в транспорте тонкодисперсных частиц графитовой пыли к поверхности теплообмена. Условия одновременно корректного моделирования гидродинамики, тепло- и массообмена в дисперсных потоках весьма жесткие, что значительно усложняет проведение экспериментального исследования.

Конкретная установка [7, 11] имеет поверхность теплообмена, которая состоит из змеевиковых спиралей, расположенных в треугольной решетке (рис. 1). Анализируя особенности проведения опытов [4-10], можно показать, что ни один из них полностью не моделирует реальные условия: либо отличаются геометрические характеристики [8-10], либо условия теплообмена [4], либо условия гидродинамики [5, 6]. Такое положение затрудняет обобщение имеющихся опытных

данных. Основное различие между данными ВНИИАМ [5-7] и ТПИ [7-10] заключается в геометрических характеристиках опытных участков и в значениях давления газа. В [7-10] моделируется зона I (рис. 1), где трубы змеевиков приближаются друг к другу и локальное число Рейнольдса (Re) меньше, чем среднее значение по ячейке.

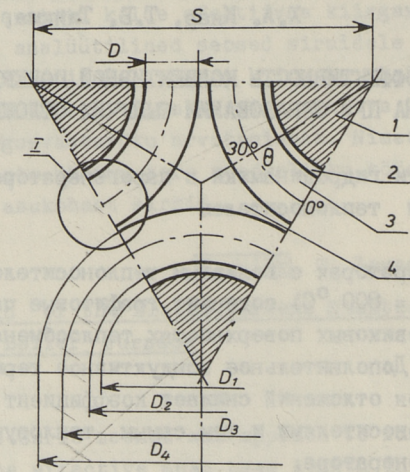


Рис. 1. Элементарная ячейка поверхности теплообмена.
 $D = 22$ мм, $D_1 = 80$ мм, $D_2 = 88$ мм, $D_3 = 110$ мм, $D_4 = 132$ мм, $S = 136$ мм. I - зона максимального локального загромождения; Θ - угол обхода; 1 - вытеснитель, 2 - щель между змеевиком и вытеснителем, 3 - труба змеевика, 4 - центральное пространство ячейки для прохода газа.

Действительно, ячейка поверхности теплообмена парогенератора имеет сложную геометрию и поэтому среднее Re может значительно отличаться от локальных. Коэффициент загромождения k_q [12-14] как отношение площади миделева сечения трубы к площади поперечного сечения канала можно рассматривать как локальную величину, которая меняется по углу обхода Θ (рис. 1) и по высоте z модуля поверхности теплообмена (ось z расположена перпендикулярно к плоскости рисунка).

В этом случае

$$k_q = \frac{4 \cos \Theta \sqrt{R^2 - (R - z)^2}}{S - D_3}, \quad (I)$$

где R - радиус трубы и $\Theta = 0 \dots 30^\circ$.
 Проведенные расчеты (рис. 2) свидетельствуют о существенном различии локальных значений от среднего $\bar{K}_q = 0,435$.

При сопоставлении данных по влиянию отложений на теплообмен, полученных на установках с различными геометрическими характеристиками,

целесообразно применять некоторые эквивалентные параметры, входящие в числа подобия. В [15] предложены выражения для средней скорости \bar{w} и эквивалентного геометрического размера L' , учитывающие неравномерность распределения потока по длине (по направлению движения потока)

и по поперечному сечению канала. Средняя скорость определяется как отношение скорости потока при пустом поперечном сечении канала w_0 к объемной доле пустот (пористости) системы ξ

$$\bar{w} = w_0 / \xi. \quad (2)$$

В случае поперечного обтекания круглой трубы $L' = \pi D/2$. В дальнейшем все опытные данные [5-10] пересчитаны на

$$Re_L = \bar{w} \cdot L' / \nu. \quad (3)$$

Гидродинамическая картина поперечного обтекания компактной ширмовой поверхности (ряда труб) в узком канале имеет ряд особенностей, влияющих на распределение скоростей по периметру трубы и на теплоотдачу. Движение потока приближается к течению по двум каналам, которые образуются разбиением общего потока на две части передними трубками ряда. В межтрубном пространстве после соударения потока о поверхность последующей трубы образуются зоны рециркуляции газа. Точка соударения расположена на углах $\varphi > 0$ (угол φ отсчитывается по периметру от лобовой образующей трубы). В зонах рециркуляции скорость может быть направлена против основного потока [14, 16].

Характерное для потенциального течения синусоидальное распределение скорости потока вокруг трубы становится при

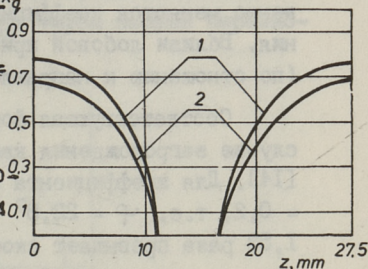


Рис. 2. Зависимость локального коэффициента загромождения K_q по направлению движения потока z при продольном шаге $S_2 = 1,25$; 1 - $\Theta = 0^\circ$, 2 - $\Theta = 30^\circ$.

загромождении канала значительно круче [I3-I5]. Соответственно меняются коэффициент давления и касательные напряжения. Вблизи лобовой критической точки возможно обратное (по отношению к направлению общего потока) течение [I4].

Соответствующая формула для определения скорости в случае загромождения канала приобретает более сложный вид [I4]. Для коэффициента загромождения $K_d = 0,846$ и при $x/D = 0,2$, т.е. $\varphi = 22,8^\circ$ скорость в загроможденном канале в 1,53 раза превышает скорость свободного обтекания, а касательные напряжения больше в 2,42 раза.

Механизм образования графитовых отложений

Рассматриваемые выше особенности течения теплоносителя из-за малого значения продольного шага S_2 поля скоростей потоков не успевают выравниваться. Угол точки соударения потока с трубой φ_R может достигать значения $50-60^\circ$ [I6], а точка отрыва пограничного слоя смещается вниз по периметру трубы (рис. 3).

С другой стороны, наличие плотной ширмовой поверхности теплообмена в узком канале приводит к низкой турбулентности потока в межтрубном пространстве и к благоприятным условиям для осаждения твердой фазы (графитовых частиц). Увеличение скорости лишь несколько смещает φ_R к меньшим значениям, что указывает на возможность существования слоя отложений в межтрубном пространстве также при больших числах Re , т.е. процесс эффективной самоочистки труб невозможен.

Увеличение коэффициента загромождения \bar{K}_d сопровождается увеличением коэффициента пропорциональности α в критериальной формуле конвективной теплоотдачи типа

$$Nu = \alpha Re^n Pr^m \quad (4)$$

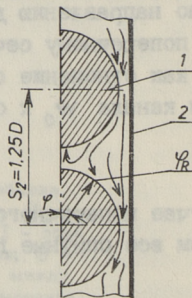


Рис. 3. Схема движения потока в узком канале [8].

1 - обтекаемый зонд, 2 - стенка канала, φ - угол обхода, отчитываемый от лобовой точки зонда, φ_R - угол точки соударения потока поверхностью трубы.

при постоянном показателе степени n [17], но локальная интенсивность теплоотдачи по периметру трубы весьма неравномерна.

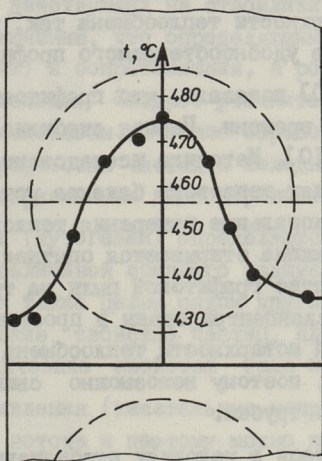


Рис. 4. Распределение температуры газового потока по ширине опытного канала. Штриховой линией указаны контуры зондов.

На рис. 4 показано распределение температуры газа по ширине канала, измеренное в межтрубном зазоре. Резкое увеличение температуры газа в центральной части при отсутствии отложений указывает на слабую турбулентность и низкий коэффициент теплоотдачи в этой зоне.

В ходе формирования отложений изменяется геометрия обтекаемой поверхности, приближаясь к мембранной или к плавниковой. Для таких поверхностей характерно уменьшение коэффициентов сопротивления и теплоотдачи [14].

Изложенные аспекты указывают, что на боковой поверхности труб, где локальный тепловой поток максимальный, отложения вовсе отсутствуют, и они расположены только в межтрубном пространстве с минимальной локальной теплоотдачей. Процесс образования стабилизированных отложений во многом определяется скоростью (числом Re) потока.

Оценка величины силового воздействия потока с данными по разрывной прочности отложений [18] для условий опытов показывает, что при значениях $\varphi < 10-12^{\circ}$ отложения не уда-

ляются, т.е. более 10 % поверхности по периметру трубы остается покрытой графитовыми отложениями. Сами отложения естественно дополнительно влияют на поле скоростей, располагаясь на поверхности теплообмена так, чтобы содействовать образованию удобнообтекаемого профиля.

Опыты [5-10] показали, что графитовые отложения стабилизируются по времени. Период стабилизации составляет 150-200 часов [10]. Методика исследования в [5, 6] базируется на измерениях теплового баланса установки, в [8-10] возможны также локальные измерения теплового потока, а после каждого режима открывается опытная установка и определяется количество графитовой пыли на трубах-калориметрах. Отложения пыли сконцентрированы в пространстве (щели) между трубами ширмовой поверхности теплообмена и иногда полностью перекрывают его, поэтому невозможно снимаемую пыль разделить отдельно по трубам.

Образовавшиеся в условиях стабилизации отложения являются результатом одновременного действия трех процессов: перпендикулярный направлению потока газа транспорт графитовых частиц к поверхности трубы, закрепление частиц к поверхности трубы или к слов ранее закрепившихся частиц пыли, а также отрыв и унос частиц потоком газа.

Имеются работы, в которых исследованы отдельно процесс захвата частиц поверхностью трубы [19, 20], и отдельно процессы сдувания частиц [18, 21] для оценки сил сцепления. Совокупность механизмов, влияющих на поведение частиц, анализирована в работах [22-24]. Роль отдельных силовых составляющих в балансе сил для частицы в потоке или на поверхности трубы определяется конкретными условиями. В случае стабилизации слоя отложений во времени между указанными процессами устанавливается некоторое динамическое равновесие. Учитывая размер частиц [25], число сил, которые могут влиять на поведение частиц в газе и на поверхность, относительно велико. Для анализа установившегося слоя отложений на поверхности трубы рассмотрены адгезионные (аутогезионные) силы [18, 21] и сила термофореза внутри слоя отложений [1, 26-28] как удерживающие частицы на поверхности и сила сопротивления как основной фактор отрыва их.

Расчетные оценки типа [1], дающие принципиальный ответ на вопрос о формировании отложений, несостоятельны ввиду сложной геометрии и гидродинамики потока.

Баланс сил, действующих на стабилизированные отложения, привел к заключению, что определяющими являются силы адгезии (аутогезии) и сопротивления, а роль термофоретических сил незначительна. Следует уточнить, что термофоретические силы значительны на этапе образования отложений при транспорте графитовых частиц к холодной поверхности [3] и малы при удержании их на поверхности.

Силы адгезии (аутогезии) определяются диаметром частицы графита и величиной среднего радиуса шероховатостей ее поверхности, а также целым рядом других условий (форма и упругопластические свойства частиц, плотность их упаковки, физико-химические свойства газа и т.п.)

Сила сопротивления (касательные напряжения) определяется скоростью потока и поэтому можно предположить, что возможна обработка опытных данных именно по числу Re . Первые попытки такого подхода опубликованы в [7, 9, 10], где данные, полученные на одной установке, согласуются неплохо. Обобщение всех данных с применением (2) и (3) позволило увеличить коэффициент корреляции зависимости тепловой эффективности от скорости потока от 0,2 до 0,5 (рис. 5).

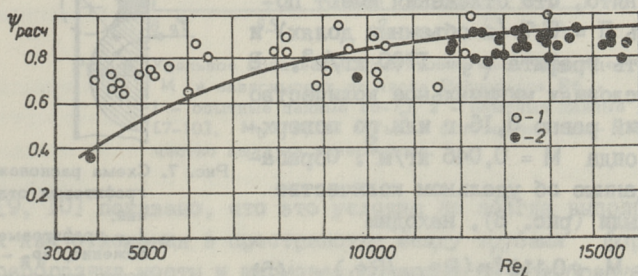


Рис. 5. Зависимость $\psi_{расч} = 1 - 1,315 \exp(-2,28 \cdot 10^{-4} Re_L)$.
1 - опытные точки [5-7], 2 - опытные точки [7-10].

Определение количества отложений и их влияние на теплообмен

Методика проведения экспериментов предусматривала открытие стенда после опыта и сбор графитовой пыли с поверхности зондов.

Имеющиеся данные обрабатывались следующим образом. По визуальным наблюдениям можно было заключить, что при чистых боковых поверхностях зондов отложения в зазорах между трубами имеют вогнутую форму (рис. 6). Принимая упрощенно, что внешняя форма отложений описывается цилиндром с диаметром $2R_0$ (рис. 7), можно определить количество пыли в "мостике". Для больших чисел, когда "мостик" отложений (I) имеет минимальное сечение, угол точки соприкосновения цилиндра находится при $\varphi_R = 13^\circ$, что принято равным углом точки соударения потока о поверхность трубы. Таким образом, диаметр модельного цилиндра R_0 определяется числом Re . В расчетах принято, что отложения имеют пористость $\Pi = 0,7$ (в объемных долях) и плотность графита $\rho_s = 1700 \text{ кг/м}^3$. В таких условиях минимальное количество отложений равно $0,16 \text{ г}$ или по поверхности зонда $M = 0,046 \text{ кг/м}^2$. Обработывая данные об удельном количестве массы пыли (рис. 8), находим

$$M = M_0 + 0,116 \ln(Re_{L,0}/Re_L), \quad (5)$$

где $Re_{L,0} = 15500$, которое найдено по численному значению M_0 .

Выражение (5) справедливо в диапазоне $3500 < Re_L < 15500$, при более высо-

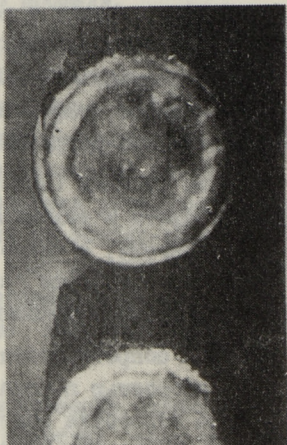


Рис. 6. Фрагмент межтрубной щели после опыта.

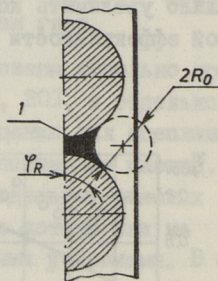


Рис. 7. Схема расположения графитовых отложений.

1 - графитовые отложения, φ_R - угол точки соударения потока на поверхность трубы, R_0 - расчетный радиус для моделирования конфигурации геометрии отложений.

ких Re_L , количество отложений остается постоянным и $M = M_0$.

Графитовые отложения являются слоем тонкодисперсных частиц [7-10], эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ которого относительно низкий, что приводит к значительным термическим сопротивлениям R_f (m^2K)/Вт даже при небольших толщинах слоя. R_f определяется через толщину слоя δ как $R_f = \delta / \lambda_{эф}$, а в опытах вычисляется как разность термических сопротивлений теплоотдачи:

$$R_f = \frac{1}{\alpha_0} - \frac{1}{\alpha_f} = \frac{1}{\alpha_0} - \left(\frac{1}{\alpha_0} + R_f \right), \quad (6)$$

где α_0 - коэффициент теплоотдачи без отложений (чистая поверхность трубы);

α_f - коэффициент теплоотдачи для загрязненной поверхности.

Выражение (6) справедливо в случае, если коэффициент теплоотдачи на поверхности загрязненной трубы равен α_0 .

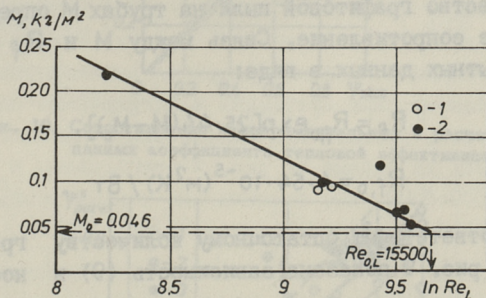


Рис. 8. Удельное количество графитовой пыли на зонде M в зависимости от числа Рейнольдса Re_L . 1 - опытные данные [5-7], 2 - опытные данные [7-10]. $M_0 = 0,046$ кг/м² - остаточное количество пыли на поверхности.

В [9, 10] показано, что это условие не всегда выполняется, так как отложения в пространстве между трубами формируют своеобразные мосты и ширмовая поверхность преобразуется к мембранной поверхности теплообмена. Интенсивность теплоотдачи "мембранной" поверхности теплообмена, где в качестве "мембраны" участвуют низкотеплопроводные графитовые отложения, ниже, чем для ширмовой поверхности при сопоставимых условиях.

Таким образом, несмотря на более однозначное физическое содержание понятия термического сопротивления отложений, методически более обоснованным является определение и анализ коэффициента тепловой эффективности ψ , как отношения воспринятого теплового потока для загрязненной и чистой поверхности. Если перепад температур между потоком газа и обтекаемой поверхностью остается постоянным (в экспериментальных установках это условие легко выполняемо), то

$$\psi = \frac{q_f}{q_0} = \frac{\alpha_f}{\alpha_0}, \quad (7)$$

где q_0 и q_f — плотности воспринятого теплового потока соответственно для чистой и загрязненной поверхностей

В целом вопрос, что предпочитать, R_f или ψ , зависит от методики обработки опытных данных, так как

$$\psi = (1 + \alpha_0 R_f)^{-1}. \quad (8)$$

Количество графитовой пыли на трубах M определяет их термическое сопротивление. Связь между M и R_f была найдена из опытных данных в виде:

$$R_f = R_{f,0} \exp[25.44(M - M_0)], \quad (9)$$

где

$$R_{f,0} = 4.54 \cdot 10^{-5} (\text{м}^2 \text{К}) / \text{Вт}, \quad (10)$$

которое соответствует остаточному количеству графитовой пыли M_0 . На рис. 9 показана зависимость (9) в координатах $\ln R_f - M$.

Сопоставление расчетных (по (5) и (9)) и экспериментальных данных по ψ (рис. 10) указывает на удовлетворительную согласованность. Линия остаточного количества отложений M_0 приводит к значению $R_{f,0}$ согласно (10). Принимая, что коэффициент теплоотдачи в парогенераторе $\alpha_0 \approx 1500$ Вт/(м²К), снижение интенсивности теплоотдачи из-за $R_{f,0}$ не превышает 10%. По-видимому, $R_{f,0}$ обусловлено не только термическим сопротивлением самих отложений, а частично уменьшением коэффициента теплоотдачи трубной поверхности с проставками из графитовых отложений по сравнению с чистой шпоровой поверхностью.

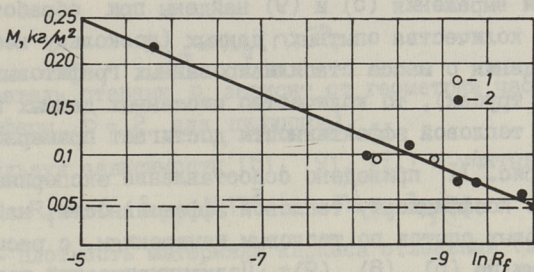


Рис. 9. Удельное количество графитовой пыли на зонде M в зависимости от термического сопротивления R_f . 1 - опытные данные [5-7], 2 - опытные данные [7-10].

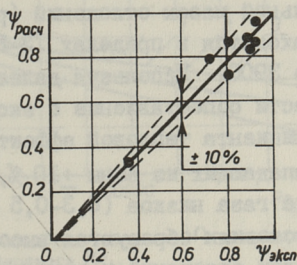


Рис. 10. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных коэффициента тепловой эффективности ψ .

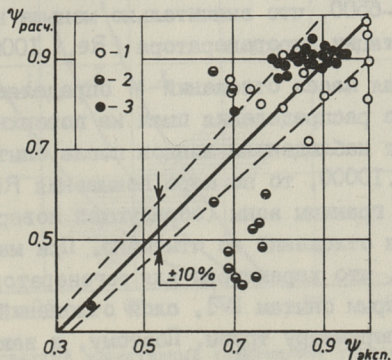


Рис. 11. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных коэффициента тепловой эффективности ψ . 1 - опытные данные [5-7] при давлении газа более 0,5 МПа, 2 - то же при давлении газа менее 0,5 МПа, 3 - опытные данные [7-10].

Если выражения (5) и (9) найдены при обработке небольшого количества опытных данных (поскольку необходимы были сведения о массе стабилизированных графитовых отложений на трубах), то количество численных данных по коэффициенту тепловой эффективности достигает примерно 60.

На рис. II приведено сопоставление экспериментальных данных по коэффициенту тепловой эффективности, найденных из стендовых опытов по тепловым измерениям, с расчетными значениями по (5), (8), (9). Полуэмпирический подход к получению расчетных значений $\psi_{расч}$ опирается на данные (измерение массы отложений), независимые от непосредственного измерения $\psi_{эксп}$ по тепловому балансу.

Расчет удельной массы отложений (рис. 7) показывает, что угол φ_R находится в пределах $13-24^\circ$ при изменении Re_L от 15500 до 3900. Используя далее зависимости (9) и (8), можно провести сопоставление с экспериментальными значениями коэффициента тепловой эффективности (рис. II). Часть данных, выпадающих из зоны $\pm 10\%$, относятся к опытам, где давление газа низкое (0,3-0,5 МПа) и число Re_L мало. В таких условиях образуются высокопористые, относительно толстые слои отложений и адгезионные силы неспособны обеспечить достаточную механическую прочность для "мостика". Эти же данные на рис. 5 расположены в диапазоне $Re_L = 4000-6500$, что значительно меньше номинальных режимов эксплуатации парогенератора ($Re_L > 10000$).

Удельная масса отложений M определяется по условию равномерного распределения пыли на поверхности трубы, что противоречит наблюдениям зондов после опытов. Однако, если $Re_L > 9000 \dots 10000$, то по мере повышения Re_L существенного перемещения границы зоны (образующей поверхности труб) расположения отложений не отмечено. При малых числах Re_L ($Re_L < 3000$), что характерно для регенератора опытного стенда и некоторым опытам [7], слой отложений равномерно расположен по периметру трубы. Поэтому, в важном для исследования диапазоне чисел Re_L ($Re_L > 10000$), площадь расположения слоя отложений на зондах изменяется мало.

Коэффициент эффективной теплопроводности сыпучих пористых порошковых материалов можно определить по формуле:

$$\lambda_{эф} = \lambda_g (\Pi)^{-p}, \quad (II)$$

где показатель степени p зависит от геометрии частиц ($p = 3$ для сферы, $p = 2$ для цилиндра).

Используя зависимости (5), (9), (II) и учитывая, что

$$R_f = \delta / \lambda_{эф} = M \Pi^p / [(1-\Pi) \rho_s \cdot \lambda_g], \quad (I2)$$

где ρ_s - плотность материала каркаса отложений (для графита принимаем $\rho_s = 1700 \text{ кг/м}^3$), определяем $\Pi^p / (1-\Pi) = f(Re)$.

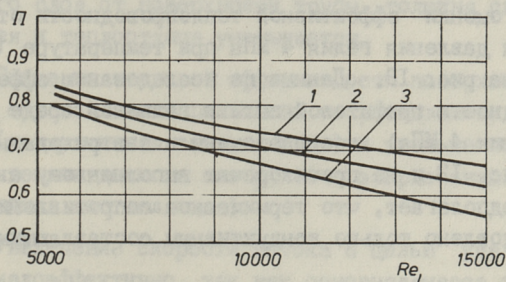


Рис. 12. Пористость отложений Π в зависимости от Рейнольдса Re_L .
1 - $p = 5$, 2 - $p = 4$, 3 - $p = 3$.

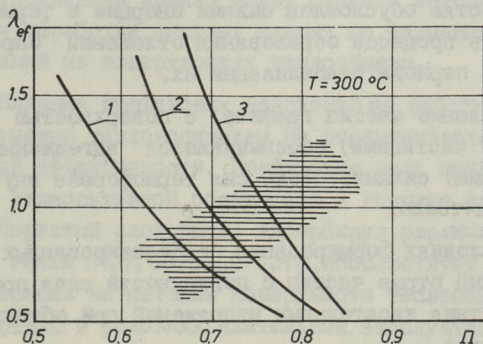


Рис. 13. Расчетный эффективный коэффициент теплопроводности графитовых отложений $\lambda_{эф}$ (Вт/(м.К)) в зависимости от пористости Π .
1 - $p = 3$, 2 - $p = 4$, 3 - $p = 5$; заштрихованная область указывает на расположение опытных данных.

Принимая, что показатель степени p является постоянным, находим зависимость пористости Π от числа Рейнольдса при различных p . Высокие численные значения p указывают, что частицы по своей геометрической форме приближаются к чешуйкам, когда один геометрический размер существенно меньше двух других. По данным рис. 12 можно заключить, что изменение p от 3 до 5 мало влияет на ход зависимости и значения пористости согласуются с опытными данными [8]. Уменьшение пористости при увеличении скорости можно объяснить уплотняющим действием динамического напора на отложения. Результаты оценки эффективной теплопроводности отложений по (II) для давления гелия 4 МПа при температуре $t = 300^\circ\text{C}$ приведены на рис. 13. Данные по исследованию эффективной теплопроводности графитовой пыли в гелиевой среде [29] (при давлении 4 МПа) сосредоточены в заштрихованной области на рис. 13 и не противоречат выполненному анализу, который предполагает, что термическое сопротивление отложений обусловлено только кондуктивным составляющим.

В ы в о д ы

1. В процессе формирования отложений транспорт тонкодисперсных графитовых частиц из потока газа к охлаждаемым поверхностям обусловлен силами инерции и термофорезом. Интенсивность процесса образования отложений определяет длительность периода стабилизации их.

2. Сцепление частиц графита с поверхностью (и с ранее осевшими частицами) обеспечивается адгезионными (и аутогезионными) силами. Роль сил термофореза внутри слоя отложений ничтожна.

3. В условиях формирования стабилизированных во времени отложений отрыв частиц с поверхности слоя происходит за счет действия касательных напряжений при обтекании трубы потоком газа.

4. Пористые отложения графита ($\Pi = 0,6-0,9$) механически малопрочны (неслипающаяся пыль). Теплопроводность отложений составляет $0,5-1,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

5. Отложения сконцентрированы в межтрубном пространстве компактной (относительный продольный шаг 1,25) ширмовой поверхности теплообмена в канале. Коэффициент загроможде-

ния велик и его локальная величина меняется по длине потока и по периметру трубы. Боковые поверхности труб практически не имеют отложений. Подобное неравномерное расположение отложений в свою очередь изменяет величины и распределение коэффициента загромождения.

6. Расположение отложений способствует образованию удобообтекаемого профиля. Ширмовая поверхность теплообмена приближается по геометрическим характеристикам к мембранной (плавниковой). Проставки между трубами в виде графитовых отложений препятствуют полному отрыву пограничного слоя от поверхности трубы, толщина слоя увеличивается и теплоотдача уменьшается.

7. Снижение тепловой эффективности поверхности теплообмена обусловлено термическим сопротивлением самих отложений (кондуктивная составляющая) и уменьшением коэффициента теплоотдачи на поверхности загрязненных труб (конвективная составляющая).

8. Увеличение скорости потока с целью удаления отложений малоэффективно, так как основная масса отложений расположена между трубами, где касательные напряжения малы.

9. Выполненный анализ может служить методической основой для обработки опытных данных по изучению формирования отложений на поверхностях теплообмена.

10. Влияние графитовых отложений на работу парогенератора с гелиевым теплоносителем не ограничивается снижением тепловой эффективности. Графитовая пыль приводит к ухудшению радиоактивной обстановки в корпусе парогенератора [30]. Пористый слой пыли, адсорбируя различные газовые примеси в гелии (H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , H_2), способствует увеличению их концентрации на металле поверхности теплообмена и их взаимодействию в условиях длительной эксплуатации.

11. Улучшение условий работы парогенератора при образовании графитовых отложений возможно их удалением с помощью специальных средств очистки.

Л и т е р а т у р а

1. H a w e s R.J., G a r t o n D.A. A heat exchangers fouling with dust suspensions // Chem. Proc. Eng. 1967. Vol. 48, N 8. P. 143-145, 150.

2. С у к о м е л А.С., Ц в е т к о в Ф.Ф., К е р и м о в Р.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при движении газозвеси в трубах. М.: Энергия, 1977. 192 с.

3. С п о к о й н ы й Ф.Е., Г о р б и с З.Р. Особенности осаждения тонкодиспергированных частиц из охлаждаемого газового потока на поперечно обтекаемой поверхности теплообмена // ТВТ-1981. Т. 19. № 1. С. 182-199.

4. М о л и н О.Г. Экспериментальное исследование теплообмена поперечно обтекаемой поверхности в слабозапыленном потоке при формировании слоя сыпучих отложений: Автореф. канд. дис. Одесса, 1984. 18 с.

5. Г л е б о в В.П., П и к у с В.Ю., Ш р а д е р И.Л. Осаждение графитовой пыли на поверхностях теплообмена в установках типа ВТГР // Теплоэнергетика. 1986, № 7. С. 24-27.

6. Г л е б о в В.П., М о с к в и ч е в В.Ф., П и к у с В.Ю., С и м к и н Б.П., Ш р а д е р И.Л. Изучение условий осаждения мелкодисперсных углеродных частиц из неизотермического потока при поперечном обтекании трубного пучка // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы паровых котлов: Тез. докл. IV Всесоюзн. конф. Таллинн, 1986. Т. IV. С. 117-122.

7. Теплофизические исследования парогенератора с гелиевым теплоносителем // Тр. Таллиннск. политехн. ин-та. 1986. № 630, 108 с.

8. O t s A., M i k k I., K ä ä r H. Heat surface fouling by graphite particles deposition from turbulent gas flow // Proc. 8-th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco. 1986. Vol. 5. P. 2561-2565.

9. O t s A., K ä ä r H. Effect of graphite deposition on heat transfer in high temperature helium flow // Fluid Mechanics and Thermodynamics. Proc. First World Conf., Dubrovnik. 1988. P. 901-906.

10. К я р Х.А., Л а у с м а а Т.М., Т и й к м а Т.В. Теплового эффективного ширмовой поверхности теплообмена в слабозапыленном высокотемпературном потоке гелия // Тепло-массообмен - ММФ: Тезисы докл. Минского международного фору-ма. Секц. 10. Минск, 1988. С. 98-100.

11. Г л е б о в В.П., С и м к и н Б.П., М о с к в и - ч е в В.Ф., О г у р е ч н и к о в а В.Г., Г р е б е н - н и к о в В.П., А р т ё м о в Л.Н., Р ы б а к о в В.П. Парогенератор для АЭС с ВГР-50 // Энергомашиностроение. 1985. № 3. С. 21-25.

12. А к ы л б а е в Ж.С., И с а т а е в С.И., К р а ш т а л е в П.А., М а с л е е в а Н.В. Влияние загромождения потока на коэффициент местной теплоотдачи од-нородно нагретого цилиндра // Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. Алма-Ата, 1966. Вып. 3. С. 179-198.

13. Ж у к а у с к а с А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.

14. А с h e n b a c h E. Strömung und konvektiver Wärmeübergang beim Kreiszyylinder und bei der Kugel. Aachen. 97 S.

15. К а с т В., К р и ш е р О., Р а й н и к е Г., В и н т е р м а н т е л ь К. Конвективный тепло- и мас-соперенос. М.: Энергия, 1980. 49 с.

16. Ж у к а у с к а с А., М а к а р я в и ч ю с В., Ш л я н ч а у с к а с А. Теплоотдача пучков труб в по-перечном потоке жидкости. Вильнюс: Минтис. 1968. 192 с.

17. Ч ж е н П.К. Отрывные течения. М.: Мир, 1973. Т. 3. 333 с.

18. Щ е л о к о в Я.М., А в в а к у м о в А.М., С а з ы к и н Ю.К. Очистка поверхностей нагрева котлов-утилизаторов. М.: Энергоатомиздат. 1984. 160 с.

19. И г н а т ь е в В.И., З в е р е в И.И. Обтека-ние цилиндра запыленным потоком // Теплоэнергетика. 1958. № 3. С. 36-40.

20. Р о о р а й д Х.А. Об осаждении частиц пыли на ширмовую поверхность // Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1965, № 226. С. 45-53.

21. З и м о н А.Д. Адгезия пыли и порошков. М.: Химия, 1976. 432 с.

22. Э п и к И.П. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Таллинн: Эст.гос.изд. 1961. 249 с.

23. П р а с о л о в Р.С. Массо- и теплоперенос в топочных устройствах. М.-Л.: Энергия, 1964. 236 с.

24. М е д н и к о в Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука 1981. 174 с.

25. К я а р Х.А., П и х у Т.К., Т а у к а р А.Х. Гранулометрический состав продуктов измельчения реакторного графита при ударном измельчении // Тр. Таллиннск. политехн. ин-та. 1984. № 579. С. 17-22.

26. Б у с р о й д Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир. 1975. 378 с.

27. Г о р б и с З.Р., С п о к о й н ы й Ф.Е. О закреплении сыпучих отложений на поверхности теплообмена // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1981. № 5. С. 183-186.

28. К я а р Х.А., Т а у к а р А.Х. К вопросу о закреплении графитовых частиц на поверхности теплообмена // Тр. Таллиннск. политехн. ин-та. 1983. № 547. С. 45-48.

29. Й ы г е р В.Э., К р у у с Р.А., К я а р Х.А. Эффективная теплопроводность графитовой пыли в среде гелия и воздуха // Тр. Таллиннск. политехн. ин-та. 1988. № 672. С. 22-31.

30. Б у т и н Н.В., Б ы л к и н Б.К., Х р у л е в А.А. Влияние радиоактивности графитовой пыли на обслуживание парогенератора // Тр. Таллиннск. политехн. ин-та. 1986. № 630. С. 66-74.

H. Käär, T. Tiikma, V. Vares

Konvektiivse küttepinna soojuslik efektiivsus
pudedate sadestiste tekkimisel

Kokkuvõte

Artiklis on toodud heeliumsoojuskandjaga aurugeneraatorite küttepinnade soojusliku efektiivsuse määramise katseandmete üldistus grafiidisadestiste tekkimisel.

Analüüsitakse grafiidiosakestele mõjuvate jõudude bilanssi gaasivoolus ja torude pinnal ning leitakse poolempirilised seosed küttepinna soojusliku efektiivsuse määramiseks.

H. Käär, T. Tiikma, V. Vares

Heat-Transfer Surface Thermal Efficiency
under the Friable Deposits' Fouling Conditions

Abstract

The heat-transfer surface thermal efficiency experimental data of the steam generator with the helium heat carrier are generalized under the graphite deposits' fouling conditions. The balance of forces, which have an effect on graphite dust particles in the gas flow and on the tube surfaces is analysed. The halfempirical relations for the heat-transfer surface thermal efficiency calculations have been found.

Х.А. Кляр, И.А. Клевцов

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ
НА РАБОТУ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Тепловые расчеты теплообменников (конструктивные и поверочные) должны учитывать дополнительные термические сопротивления теплопередаче, обусловленные формированием различного рода отложений на поверхности теплообмена.

В настоящее время при проектировании теплообменников пользуются осредненными значениями термического сопротивления стабилизированных во времени отложений [1-6]. При этом часто отмечается, что вследствие отсутствия надежных данных о степени влияния загрязнений на теплопередачу ими можно пренебречь. Банк этих данных действительно весьма скуден, и приводимые сведения часто имеют лишь ориентировочный характер. Такое положение усиливает необходимость выяснения роли отложений в работе теплообменника, что позволило бы принимать обоснованные решения об использовании средств очистки, о чувствительности конкретного теплообменника к отложениям, при оптимизации его и т.п. в условиях неопределенности информации о термическом сопротивлении слоя отложений.

Проанализируем поверочный тепловой расчет рекуперативных теплообменников для случая отсутствия отложений (параметры с индексом "0") и при загрязненных поверхностях теплообмена, когда термическое сопротивление отложений равно $R_{отл}$ ($m^2 \cdot K / Вт$). Термическое сопротивление отложений является постоянной величиной, не зависящей от времени, скоростей потоков и температурных условий. Массовые расходные теплоемкости теплоносителей (C_1, C_2) и поверхность теплопередачи (F) в сравниваемых вариантах принимаем постоянными. Коэффициент теплопередачи в теплообменнике с отложениями

$$k = (1 / k_0 + R_{отл})^{-1}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} \quad (1)$$

и в зависимости от $R_{отл}$ изменяются выходные температуры теплоносителей (t_1'', t_2'') и тепловая мощность аппарата (Q).

Чувствительность теплообменника к воздействию термического сопротивления отложений будем характеризовать безразмерной величиной

$$X = \frac{1}{\Delta t'} \cdot \frac{d(Q)}{d(k)}, \text{ м}^2, \quad (2)$$

где $\Delta t'$ - перепад температур между теплоносителями на входе, а тепловая мощность принята на единицу площади теплообмена ($F = 1 \text{ м}^2$). X зависит от $kF/c_1, c_1/c_2$ и от схемы движения теплоносителей.

Особенностью анализа является то обстоятельство, что величина коэффициента теплопередачи может изменяться (из-за образования отложений) при постоянных значениях скорости и массовых расходных теплоемкостей теплоносителей.

Для прямо- и противоточной схем движения теплоносителей получаем соответственно

$$X_n = \exp[-k/c_1(1 + c_1/c_2)] \quad (3)$$

$$X_z = (1 - c_1/c_2)^2 \cdot \exp[-k/c_1(1 - c_1/c_2)] \cdot \{1 - c_1/c_2 [\exp(-k/c_1(1 - c_1/c_2))]\}^2. \quad (4)$$

При $c_1 = c_2$

$$X = [1 + 2(k/c_1) + (k/c_1)^2]^{-1}, \quad (5)$$

а при $c_1/c_2 = 0$

$$X = \exp(-k/c_1). \quad (6)$$

Из анализа кривых рис. 1а и 1б, полученных по (3) и (4), можно сделать следующие выводы:

- чувствительность к отложениям мало зависит от применяемой схемы движения теплоносителей;

- чувствительность к отложениям снижается при малых значениях c_1/c_2 ($c_1/c_2 < 1$);

- чувствительность к отложениям мала при больших значениях k/c_1 ($kF/c_1 > 1$ при $F = 1 \text{ м}^2$), что соответствует малому перепаду температур между теплоносителями по сравнению с изменением температуры теплоносителя.

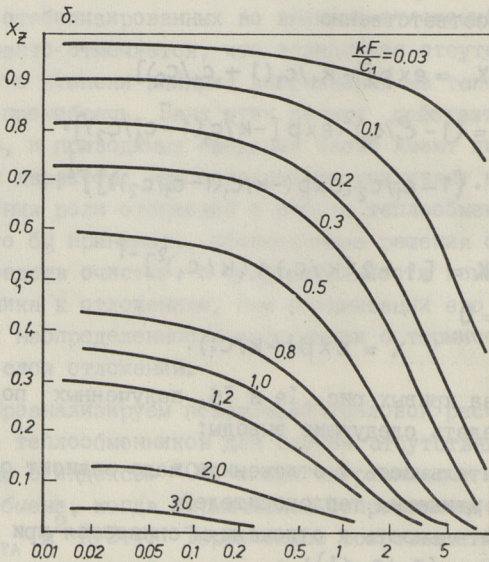
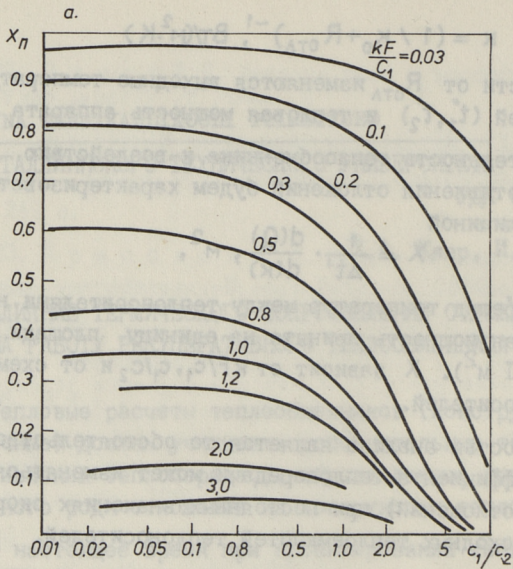


Рис. 1. Чувствительность тепловой мощности теплообменника к изменению термического сопротивления отложений:
 а - для прямоточной схемы движения по (3),
 б - для противоточной схемы движения теплоносителей по (4).

Незначительное влияние схемы движения теплоносителей на чувствительность теплообменников к воздействию отложений подтверждается также рис. 2, где

$$\gamma = d(Q_1/Q_2)/d(k) \text{ (м}^2\text{К/Вт)} \quad (7)$$

изменяется в пределах от -10^{-4} до $-0,3$. Максимальная чувствительность наблюдается при малых k/c_1 ($k/c_1 < 1$) и для некоторого интервала величины c_1/c_2 .

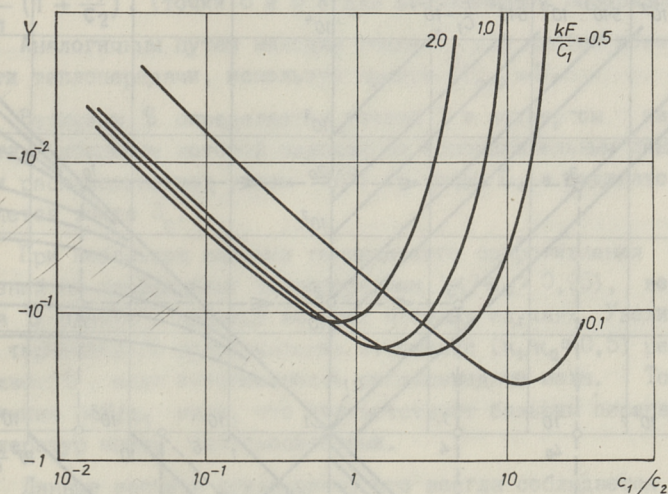


Рис. 2. Сравнение чувствительностей тепловой мощности теплообменников к изменению термического сопротивления отложений при различных схемах движения теплоносителей по (7).

Общеизвестно, что возникновение отложений приводит к снижению интенсивности теплопередачи в теплообменнике, но этот факт сам по себе не позволяет обосновать рекомендации по методам или режимам очистки. Влияние большого числа факторов на образование отложений и на их термическое сопротивление и, как следствие, нехватка достоверных данных приводит либо к игнорированию отложений, либо к чрезмерному их учету (переразмеренные теплообменники). Для оценки степени влияния термического сопротивления отложений на работу теплообменника удобно применять номограммы, с помощью которых можно легко получать информацию для выбора дальнейших решений.

Рассмотрим прямоточный рекуперативный теплообменник (выше показано, что схема движения теплоносителей на уровень воздействия отложений в теплообменниках влияет незначительно). Принимаем, что для однофазных теплоносителей площадь поверхности теплопередачи равна F , по величине отношения тепловых мощностей для "загрязненной" и "чистой" (с индексом 0) поверхностей S определяем влияние термического сопротивления отложений $R_{отл}$.

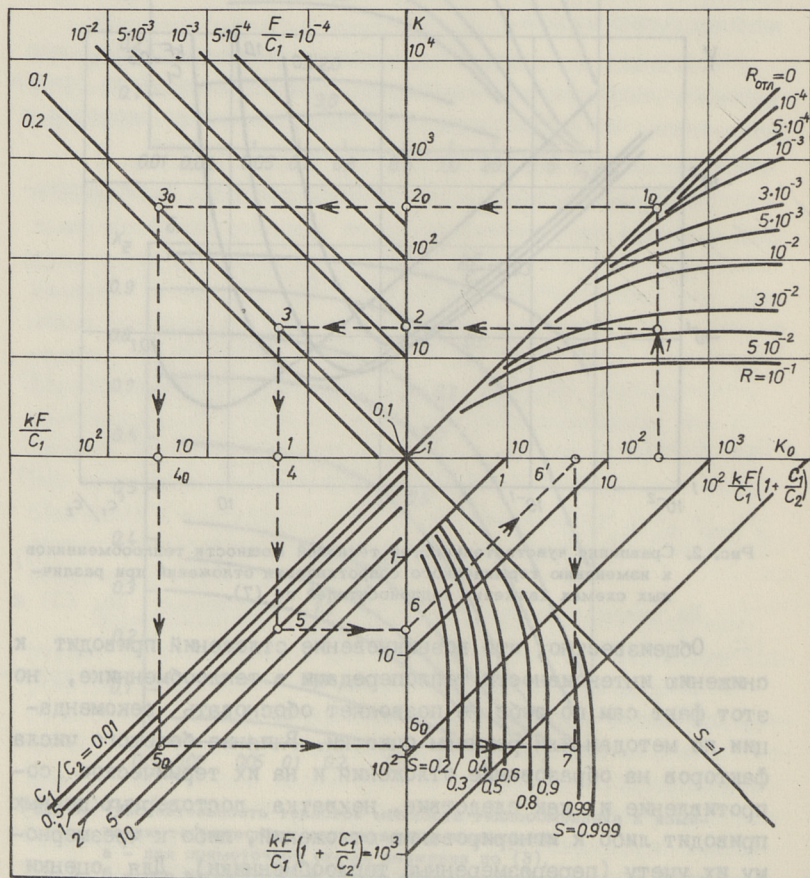


Рис. 3. Номограмма для определения степени влияния термического сопротивления отложений R на уменьшение тепловой мощности прямоточного рекуперативного теплообменника.

Оси K_0 и $\frac{k \cdot F}{C_1} \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)$ совпадают.

Таким образом, безразмерная величина

$$S = f(k_0, R_{отл}, F/c_1, c_1/c_2). \quad (8)$$

На рис. 3 показана соответствующая номограмма. По известной величине коэффициента теплопередачи k_0 (на шкале k_0) в первом квадранте определяют точку 1 при пересечении с линией $R_{отл}$ и на шкале k величину коэффициента теплопередачи для загрязненной поверхности теплопередачи (точка 2). Точки 3 и 5 находим во втором и третьем квадрантах по значениям F/c_1 и c_1/c_2 и определяем величину $\frac{kF}{c_1} (1 + \frac{c_1}{c_2})$, (точки 6 и 6')

для загрязненной поверхности. Аналогичным путем находим точку 6_0 для чистой поверхности теплопередачи, используя прямую $R_{отл} = 0$.

Величина S определяется точкой 7 в четвертом квадранте, абсциссу которой находим по вспомогательным линиям (они расположены под углом 45°) от точки 6, а ординатой является точка 3_0 .

При небольшом влиянии термического сопротивления отложений на коэффициент теплопередачи ($k/k_0 > 0,95$), величина S близка к единице во всех частных случаях. Увеличение термического сопротивления отложений ($k_1/k_0 \approx 0,5$) резко снижает S , если интенсивность теплопередачи мала. Тогда величина kF/c_1 мала, что соответствует большим перепадам температур между теплоносителями.

Данные расчета показывают, что всегда соблюдается условие $k/k_0 \leq S$. Действительно, уменьшение коэффициента теплопередачи из-за термического сопротивления отложений, приводит к некоторому повышению температурного напора между теплоносителями, что отчасти компенсирует уменьшение тепловой мощности теплообменника. Вариант теплообменника с высоким kF/c_1 , чему соответствуют малые температурные напоры, имеет низкую чувствительность к отложениям, но обеспечение малых температурных напоров в теплообменнике связано с увеличением поверхности теплопередачи и соответствующих затрат.

Важно отметить, что в экспериментальных методиках по исследованию термического сопротивления отложений часто следят за изменением тепловой мощности установки. Если на модели величина (kF/c_1) больше, чем на действительном аппа-

рате, то при практически постоянной тепловой мощности ($S \approx I$) возможно существенное уменьшение коэффициента теплопередачи из-за дополнительного термического сопротивления слоя отложений ($K/K_0 < I$), что по методическим причинам остается неопределенным и приводит к ошибочным выводам.

Проведенный анализ может также оказаться полезным при определении эффекта от интенсификации теплообмена. Интенсификацию теплообмена следует в этом случае выражать в виде "отрицательного" термического сопротивления.

Л и т е р а т у р а

1. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977. 464 с.
2. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. М.: Энергоиздат, 1981. 384 с.
3. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
4. Справочник по теплообменникам. Т. 2 / Под ред. О.Г. Мартыненко и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. 352 с, (перевод с англ.).
5. Thielbahr W. Opportunities in applied heat transfer research // Heat Transfer Engineering. 1984. V. 5, N 1-2. P. 62-67.
6. Murty K.H. Assessing fouling in heat exchangers // Chemical Engineering. 1984. V. 91, N 16. P. 93-94.

Sadestiste termilise takistuse mõju
rekuperatiivse soojusvaheti tööle

Kokkuvõtte

Artiklis uuritakse sadestiste termilise takistuse mõju soojusvaheti efektiivsusele ning tuuakse kasutamiseks vastav nomogramm.

H. Käär, I. Klevtsov

Influence of the Thermal Resistance of the
Deposits on Recuperative Heat Exchanger Work

Abstract

Thermal resistance influence of deposits on heat exchanger efficiency has been studied in the present paper and respective nomograph is shown here as well.

С о д е р ж а н и е

1.	Роотамм Р.Э. Ыйспуу Л.М., Фадеев В.В., Раюр К.Э. <u>Характеристики готовой пыли сланца в зависимости от технического состояния пылесистем котлов ТП-67</u>	3
2.	Роотамм Р.Э. Ыйспуу Л.М., Вюрст Э.Р. Об испытаниях лабораторной модели молотковой мельницы с малогабаритным сепаратором конструкции ВТИ-Эстонглавэнерго.....	24
3.	Шварц В. Новый упрощенный критерий качества каменных углей.....	37
4.	Отс А.А., Рандманн Р.Э., Сууркууск Т.Н., Сийрде А.Э., Абрам Я.Б. Влияние полупикового режима на условия работы пароперегревателя пылесланцевого котла.....	45
5.	<u>Микк И.Р.</u> , Лаусмаа Т.М., Тийкма Т.Б. К расчету ширм, размещенных в топку парового котла.....	53
6.	Кяар Х.А., Тийкма Т.Б., Варес В.А. Тепловая эффективность конвективной поверхности теплообмена при образовании сыпучих отложений.....	63
7.	Кяар Х.А., Клевцов И.А. Влияние термического сопротивления отложений на работу рекуперативного теплообменника.....	82

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
Теплоэнергетика XXXVII

УДК 621.928.6

Характеристики готовой пыли сланца в зависимости от
технического состояния пылесистем котлов ТП-67.

Роотамм Р.Э., Ыйспуу Л.М., Раур К.Э. - Труды
Таллиннского технического университета. 1989,
№ 698, с. 3-23.

Приводятся результаты промышленных испытаний пылесистем котлов ТП-67 Прибалтийской ГРЭС - молотковых мельниц с малогабаритными сепараторами конструкции ВТИ-Эстонглавэнерго. Установлено, что из-за большой интенсивности процесса сепарации точность изготовления и монтажа пылесистем существенно влияет на качество выдаваемой пыли.

Таблиц - 6, рисунков - 6, библиографических наименований - 2.

УДК 621.929.46:622.965

Об испытаниях лабораторной модели молотковой
мельницы с малогабаритным сепаратором конструкции
ВТИ-Эстонглавэнерго. Роотамм Р.Э., Ыйспуу Л.М.,
Вюрст Э.Р. - Труды Таллиннского технического
университета, 1989, № 698, с. 24-36.

Рассматриваются результаты испытаний лабораторной установки, состоящей из модели молотковой мельницы и малогабаритного сепаратора. Делается вывод, что основным фактором, определяющим гранулометрические характеристики готовой пыли, является угол встречи мельничного продукта с

задней стеной сепаратора. Даются рекомендации по управлению качеством пыли и снижению колебаний качества от износа бил.

Таблиц - 2, рисунков - 5, библиографических наименований - 2.

УДК 662.62

Новый упрощенный критерий качества каменных углей.

Шварц В. - Труды Таллиннского технического университета. 1989, № 698, с. 37-44.

На основе анализа параметров, определяемых для оценки качества энергетического твердого топлива (теплотворная способность, влаго- и золосодержание), предлагается новая характеристика топлива - критерий Шварца. Этот критерий позволяет без дополнительных лабораторных анализов прогнозировать протекание топочного процесса и влияния золосодержания на условия работы теплообменных поверхностей. Критерий Шварца уже вошел в практику инженерных расчетов Чехословакии.

Рисунков - 1.

УДК 621.182

Влияние полупикового режима на условия работы пароперегревателя пылесланцевого котла. Отс А.А.,

Рандманн Р.Э., Сууркууск Т.Н., Сийрде А.Э.,
Абрам Я.Б. - Труды Таллиннского технического университета, 1989, № 698, с. 45-52.

Представлены данные о влиянии остановов котла на 20-40 часов в горячий резерв на самообрушение отложений с ширмового пароперегревателя котла ТП-101. Также приведены возможности использования таких остановов для уменьшения скорости коррозии поверхностей нагрева, работающих в условиях комбинированной очистки.

Таблиц - 1, рисунков - 5, библиографических наименований - 3.

УДК 536.24:621.181

К расчету ширм, размещенных в топку парового котла.

Микк И.Р., Лаусмаа Т.М., Тийкма Т.Б. - Труды
Таллиннского технического университета, 1989,
№ 698, с. 53-62.

Методом Монте-Карло анализирована геометрическая система, состоящая из ширм, размещенных в топку и в результате этого уточнена формула для расчета эффективного пути луча для такой топки. Выведены аналитические зависимости для расчета коэффициентов неравномерности освещенности ширм и прилегающих к ним экранов. Получена формула для определения относительной освещенности одиночной трубы в ширме, позволяющая оценить условия работы отдельных труб в ширме в зависимости от их расположения в ширме.

Таблиц - 1, рисунков - 6, библиографических наименований - 2.

УДК 621.039:536.24

Тепловая эффективность конвективной поверхности теплообмена при образовании сыпучих отложений.

Кяр Х.А., Тийкма Т.Б., Варес В.А. - Труды
Таллиннского технического университета, 1989,
№ 698, с. 63-81.

Дано обобщение экспериментальных данных по тепловой эффективности поверхностей теплообмена в парогенераторах с гелиевым теплоносителем при образовании графитовых отложений.

Анализирован баланс сил, действующих на частицы графитовой пыли в потоке газа и на поверхностях труб. Предложены полуэмпирические соотношения для расчетного определения коэффициента тепловой эффективности поверхности теплообмена.

Рисунков - 13, библиографических наименований - 30.

УДК 621.565.942

Влияние термического сопротивления отложений на работу рекуперативного теплообменника. Клар Х.А., Клевцов И.А. - Труды Таллиннского технического университета, 1989, № 698, с. 82-89.

В статье изучено влияние термического сопротивления отложений на тепловую эффективность теплообменника и приведена соответствующая номограмма.

Рисунков - 3, библиографических наименований - 6.

Цена 95 коп.

EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00133745 4