

Er. 6.7
392

TALLINNA POLÜTEHNILISE
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 392

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Сборник статей

XV

ТАЛЛИН 1976



Er. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 392

1976

УДК 621

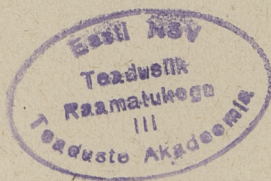
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Сборник статей

XV

Таллин 1976

7.3.97



© ТПИ, Таллин, 1976

УДК 66.022:621.920.8:662.67 + 621.928.6:662.87:
662.67 + 662.87:662.67:66.014:66.017

К. Я. Полферов, А. Н. Семенов, А. В. Прикк,
Л. М. Ыйспуу, Н. В. Челищев, С. В. Иванов

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО РАЗМОЛА СЛАНЦЕВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

Исследование многоступенчатого размола сланцев проведено ВТИ, ТПИ и Эстонглавэнерго.

Эстонские горючие сланцы, как и другие твердые топлива, представляют собой многокомпонентную систему, основными составляющими которой являются органическая, карбонатная и песчаноглинистая части, содержащиеся в сравнимых количествах. Минеральная часть сланцев состоит из кальцита, доломита, кварца, ортоклаза, гидрослюда, марказита и др.

Особенностью эстонских сланцев является существенное отличие свойств отдельных компонентов по плотности, размолоспособности, структуре и минералогическому составу.

Указанные особенности дают основание полагать, что при подготовке эстонских сланцев к сжиганию весьма эффективным может быть ступенчатый метод их размола [1, 2].

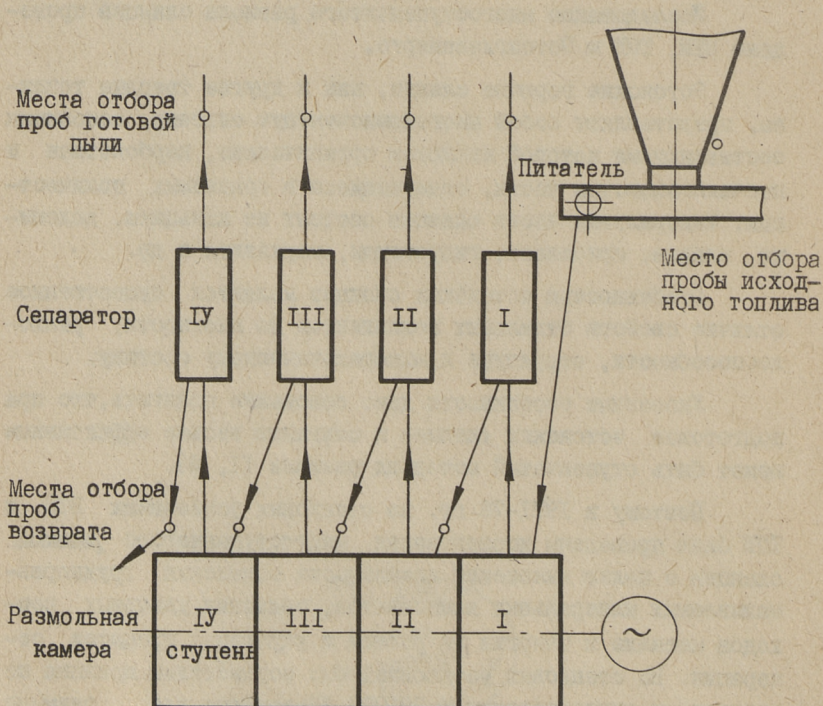
Поэтому в 1971-72 гг. на стендовых установках ВТИ и ТПИ были проведены исследования многоступенчатого размола сланцев с целью выяснения возможности отделения труднорастворимых минеральных компонентов, снижения удельных расходов металла и энергии на размол и улучшения процесса сепарации. На стендовых установках был осуществлен принцип по авторскому свидетельству № 398272 "Установка для размола топлива" [2].

По данным [3-7] при размоле горючих сланцев в различных пылеприготовительных системах наблюдается концентрация

материала с высокой плотностью в более тонких фракциях. На основе данных химического анализа золы в них концентрируются составляющие песчано-глинистой части - кварц, ортоклаз и полевые шпаты, то есть основные калиесодержащие компоненты сланцев. В то же время при почти одинаковой плотности карбонатной и песчано-глинистой частей более монолитные и относительно трудноразрушаемые (несмотря на то, что размолоспособность кальцита выше размолоспособности кварца и ортоклаза) составляющие компоненты карбонатной части остаются в сравнительно крупных фракциях.

При многоступенчатом размоле сланцев можно ожидать, что компоненты песчано-глинистой части с мельчайшей струк-

В пылеотделители



Фиг. I. Схема четырехступенчатого размола.

турой выходят вместе с готовой пылью первых ступеней, а карбонатная часть накапливается в возврате сепараторов последних ступеней.

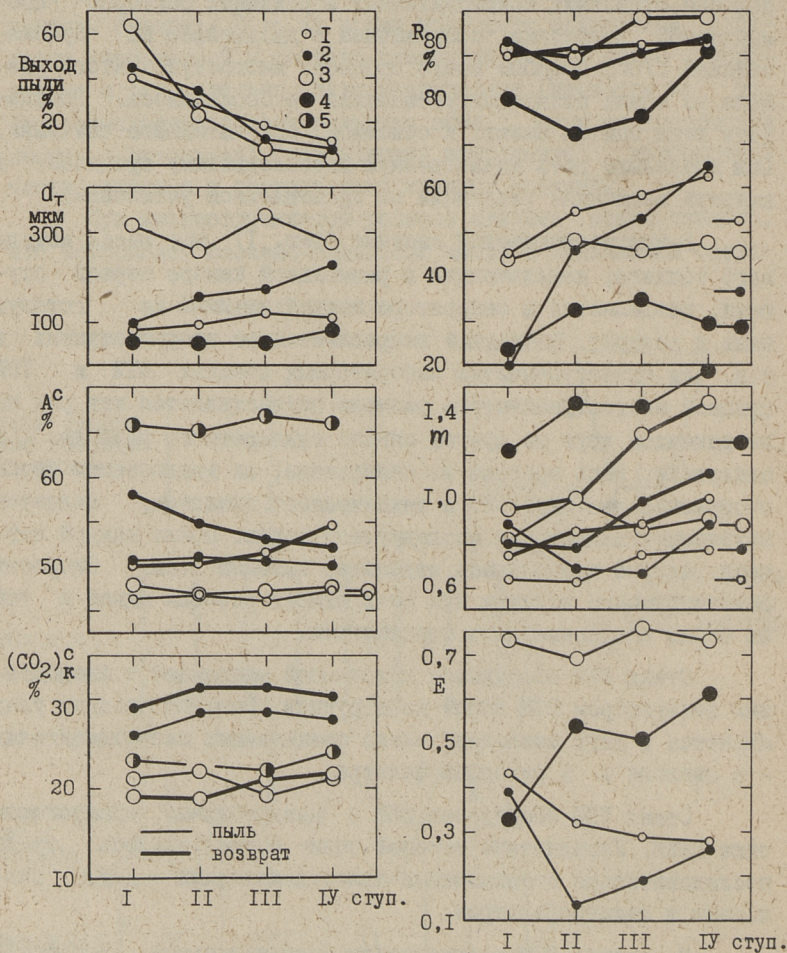
При проведении опытов на стенде ВТИ было соблюдено подобие отдельных конструктивных и режимных факторов промышленной установки, сооруженной в дальнейшем на Прибалтийской ГРЭС. Подобие всего процесса многоступенчатого размола на обеих стендовых установках не соблюдалось. Результаты этих опытов имеют, в основном, сравнительное значение. Они позволяют дать качественную характеристику процесса и выявить возможные тенденции на промышленной установке.

В многоступенчатой системе (фиг. I) вся масса исходного топлива, измельченная в размольной камере первой ступени, разделяется в сепараторе первой ступени на готовую пыль и возврат. Последний направляется во вторую ступень и т.д. На одноступенчатых лабораторных стендах ВТИ и ТПИ процесс многоступенчатого размола осуществляется как ряд повторяющихся друг за другом циклов однократного размола и сепарации. Весь возврат из сепаратора, за исключением проб, отобранной для ситового и технического анализов, является исходным топливом для последующего цикла. После каждой ступени размола проводилось отделение готовой пыли. Скорости вентилярующего воздуха при всех циклах размола одной и той же серии поддерживались одинаковыми.

Стенд ВТИ оборудован молотковой мельницей и инерционным сепаратором ВТИ новой конструкции. Готовый продукт улавливается в двух последовательно соединенных пылеотделителях - в циклоне и в рукавном фильтре.

Стенд ТПИ оборудован ШБМ с центробежным сепаратором типа ЦККБ. Улавливание готовой пыли осуществлялось тремя последовательно соединенными пылеотделителями - двумя циклонами и электрофильтром.

На стенде ВТИ размалывался воздушносухой эстонский сланец фракции 2-8 мм, а на стенде ТПИ фракции 0-7 мм. Пробы пыли и возврата отбирались после перемешивания всего количества возврата и пыли, полученного за опыт. Далее полученные пробы подвергались ситовому и неполному техническому анализам.



Фиг. 2. Изменение выхода пыли, границы разделения сепаратора d_T , точности разделения E , зольности A^C , содержания углекислоты карбонатов $(CO_2)_K$, точности по R_{80} и показателя однородности m пыли и возврата по ступеням.

I-стенд ВТИ, I серия; 2-стенд ВТИ, II серия; 3-стенд ТПИ, I серия; 4-стенд ТПИ, II серия и 5-пыль, уловленная в рукавном фильтре во II серии опытов на стенде ВТИ.

Всего проведено на стенде ВТИ три серии опытов и на стенде ТПИ две серии опытов по схеме многоступенчатого размола. Обширному изучению подвергались две серии опытов, проведенные на стенде ВТИ, и одна серия опытов стенда ТПИ.

Качественные характеристики готовой пыли и возврата по ступеням, а также основные характеристики работы сепараторов ступеней для трех серий опытов представлены в табл. I. По приведенным в табл. I и на фиг. 2 данным видно, что выход готовой пыли из ступеней при одинаковых размольных камерах, сепараторах и скоростях воздуха постепенно уменьшается. При удалении всего возврата IV ступени наибольший относительный выход готовой пыли в I ступени — 63–40 % и наименьший в IV ступени — 12–4 %. По ходу ступеней наблюдается угрубление готовой пыли, особенно в опытах с молотковой мельницей на стенде ВТИ. Зольность пыли по ступеням (см. фиг. 2 и 5) практически постоянная. По ходу ступеней содержание углекислоты карбонатов в готовой пыли несущественно увеличивается при пробах II серии опытов на стенде ВТИ и существенно увеличивается в III серии опытов на стенде ВТИ, см. содержание CaO на фиг. 5. По ходу ступеней содержание балласта, $A + (CO_2)_K$, возврата во всех ступенях превышает содержание минерального балласта в готовой пыли. По приведенным данным баланс золы и углекислоты карбонатов не сходится, так как возврат последней ступени удаляется и на стенде ВТИ уловленная в рукавном фильтре пыль не входит в состав готовой пыли B.

По приведенным в табл. 2 и на фиг. 3 данным наблюдается характерное для измельченных сланцев \sim -образное изменение содержания золы по ситовым фракциям пыли и возврата различных ступеней. Вышеописанное изменение зольности по ситовым фракциям, размолотых в четырехступенчатой установке сланцев, совершенно аналогично изменению зольности фракции пыли одноступенчатого размола, см. [3,4,5,6]. Влияние четырехступенчатого размола выражается лишь в изменении зольности в ситовых фракциях от 40 до 80 мкм пыли ступеней, которая увеличивается в сторону последних ступеней от 38 до 44 % (фиг. 3а). Кривая изменения зольности фракций пыли первой ступени лабораторной ШЕМ (стенд ТПИ) перемещена несколько влево по сравнению с подобной кривой для пыли мо-

Транкулометрические и технические характеристики исследуемых шпелей и характеристики работ сепараторов огуленей

	I ступень			II ступень			III ступень			IV ступень			Суммарные		
	ВТИ I серия	ВТИ II серия	ТПИ I серия	ВТИ I серия	ВТИ II серия	ТПИ I серия	ВТИ I серия	ВТИ II серия	ТПИ I серия	ВТИ I серия	ВТИ II серия	ТПИ I серия	ВТИ I серия	ВТИ II серия	ТПИ I серия
Тонкость шпелей по пол- ным остаткам: $R_{90}, \%$	45,39	19,8	43,88	54,44	45,5	47,97	58,18	52,9	45,88	62,67	64,5	47,53	52,52	36,63	45,18
$R_{200}, \%$	30,78	7,90	14,90	34,71	26,04	13,43	33,65	29,81	17,19	35,24	34,14	16,01	39,0	19,16	14,82
Тонкость возврата по пол- ным остаткам: $R_{90}, \%$	90,00	93,2	91,49	91,35	86,0	89,86	92,53	90,6	98,95	92,82	93,2	98,32	-	-	-
$R_{200}, \%$	76,49	77,69	85,56	76,81	64,82	79,76	75,88	73,11	97,29	73,28	73,88	96,02	-	-	-
Мелочный диаметр: готовой шпели, d_5 , мм	68	33	62	95	70	78	105	89	70	110	150	73	85	51	68
возврата d_5 , мм	600	630	710	525	310	470	490	400	890	400	370	640	-	-	-
Опорожность в лотар- ной сетке: готовой шпели, m^6	0,64	0,89	0,82	0,63	0,69	1,00	0,75	0,67	0,86	0,77	0,88	0,91	0,62	0,77	0,88
возврата m^6	0,75	0,81	0,96	0,85	0,78	1,00	0,88	0,98	1,29	1,00	1,11	1,43	-	-	-
Удельная крепность, циркуляции сепаратора, К	2,98	2,41	1,65	2,79	1,82	1,75	2,63	2,10	1,87	2,06	1,85	1,96	-	-	-
Граница разделения сепаратора, d_1 , мм	79	100	315	95	155	260	120	175	340	110	225	280	-	-	-
Средний выход гото- вой шпели (прям.), $\%$	40	44,3	63	29	34,3	24	19	13,4	9	12	8,0	4	100	100	100
Зольность готовой шпели (прям.), $\%$	50,60 (II)	50,96 (II)	50,77 (II)	46,73	65,26 (I)	46,83	46,23	67,95 (I)	47,02	47,33	66,08 (I)	47,53	46,65	52,35	47,25
возврата $A^0, \%$	46,58	65,87 (I)	47,72	50,91	54,90	48,46	51,29	53,05	46,84	54,68	52,16	51,62	-	-	-
Содержание углекислоты карбонатов (CO_2), $\%$	50,62	58,02	46,53	28,43 (II)	28,43 (II)	28,43 (II)	28,44 (II)	28,44 (II)	28,44 (II)	28,44 (II)	28,44 (II)	28,44 (II)	27,65 (II)	-	-
в готовой шпели	-	23,22 (I)	21,89	-	-	21,81	-	21,89 (I)	19,42	-	23,97 (I)	21,02	-	-	21,80
в возврате	-	29,21	19,10	-	31,30	18,91	-	31,33	20,92	-	30,28	21,50	-	-	-

Примечания: 1) Относительный выход готовой шпели при давлении всего возврата IV ступени шпелевыми.
2) (I) - шпиль, уложенный в циклоне и (II) - шпиль, уложенный в рукавной фильтр.

Данные granulометрического анализа и осознания исследуемых пылей

Станд. БТИ, I серия

№ п/п	Пределы фракций, мм	Исходное топливо		ГОТОВАЯ ПЫЛЬ СТУПЕНЕЙ									
		выход фракций, %	вольность, АС, %	В ₁ выход фракций, %	вольность, АС, %	В ₂ выход фракций, %	вольность, АС, %	В ₃ выход фракций, %	вольность, АС, %	В ₄ выход фракций, %	вольность, АС, %		
I	0-40	3,82	53,53	33,35	53,36	25,53	53,58	21,53	53,63	19,57	53,64		
2	40-50	0,57	35,80	7,77	38,50	5,50	40,66	6,26	41,24	5,16	44,80		
3	50-63	0,57	37,61	7,63	37,51	8,94	40,72	7,50	39,86	7,50	43,71		
4	63-80	0,29	43,32	5,86	38,46	5,59	38,88	6,53	40,91	5,10	40,84		
5	80-125	0,46		8,99	44,30	11,63	44,57	13,99	43,22	15,05	44,79		
6	125-200	0,27	52,68	5,62	49,50	8,10	48,55	10,54	49,48	12,38	50,06		
7	200-315	0,25		5,19	51,05	7,71	51,00	9,64	49,44	10,54	47,37		
8	315-500	0,47	49,45	7,03	49,56	9,95	51,91	10,70	47,45	11,42	50,92		
9	500-800	0,79		6,41	46,56	7,56	42,79	7,07	44,38	7,62	43,24		
10	800-1250	2,28	48,19	6,24	44,19	6,18	38,66	4,51	39,63	4,45	38,79		
II	1250-2000	18,98	48,79	3,94	36,46	2,57	36,93	1,49		1,09			
12	2000-2500	14,53	49,86	1,28	31,58	0,51		0,19	23,92	0,07	34,26		
13	2500-5000	35,84	50,16	0,69	28,19	0,23		0,05		0,05			
I4	> 5000	20,88	49,07	-	-	-	-	-	-	-	-		
Среднее по расчету		100,00	49,51	100,00	46,58	100,00	46,73	100,00	46,23	100,00	47,33		

Примечание: готовая пыль В₁-В₄ без пыли, уловленной в рукавном фильтре.

№ п/п	Пределы фракций МЕМ	Стенд ВТИ, I серия						Стенд ТИИ, I серия					
		Возврат сепаратора			Возврат сепаратора			Возврат сепаратора			Возврат сепаратора		
		Г1	Г2	Г3	Г4	Г5	Г6	Г7	Г8	Г9	Г10	Г11	Г12
		выход фракций, %	зольность А, %	выход фракций, %	зольность А, %	выход фракций, %	зольность А, %	выход фракций, %	зольность А, %	выход фракций, %	зольность А, %	выход фракций, %	зольность А, %
I	0-40	3,90	53,55	2,66	53,79	2,33	54,51	1,72	56,79	1,20	48,57	39,16	53,56
2	40-50	1,50	45,66	1,38	47,53	1,19	48,76	0,99	51,38			3,64	42,51
3	50-63	2,21	45,37	2,36	46,62	1,98	49,81	1,77	52,71	1,10	43,48	8,04	41,51
4	63-80	2,39	45,92	2,25	46,80	1,97	47,89	2,70	51,17			5,28	42,53
5	80-125	6,66	48,94	6,95	49,51	7,52	50,36	8,51	53,40			14,55	47,31
6	125-200	6,85	51,81	7,59	52,02	9,13	54,03	11,03	54,79	1,68	57,82	14,43	46,73
7	200-315	8,19	50,82	9,62	51,95	10,96	54,36	13,31	55,78	7,97	57,39	10,87	40,34
8	315-500	12,40	50,27	14,30	52,04	16,24	52,90	18,53	55,61	24,18	46,91	9,73	31,90
9	500-800	13,36	51,85	15,12	49,02	16,61	52,40	17,62	55,28	25,76	41,03	0,30	27,36
10	800-1250	16,55	51,36	17,56	51,82	17,45	47,20	15,40	54,85	19,21	40,60	-	-
11	1250-2000	14,58	52,13	13,47	50,83	10,88	50,86	7,14	52,21	11,81	38,74	-	-
12	2000-2500	4,95	49,80	3,59	50,71	2,23	44,97	1,03	50,39	3,19	37,50	-	-
13	2500-5000	5,33	47,56	2,98	52,79	1,51	50,79	0,25	-	3,90	34,74	-	-
14	> 5000	1,13		0,17		-		-		-		-	
	Среднее по расчету	100,00	50,62	100,00	50,91	100,00	51,29	100,00	54,68	100,00	43,44	100,00	47,37

(> 7500)

Стенд ВТИ, II серия

№ п/п	Пределы фракций, мкм	Возврат сепаратора			
		G1		G4	
		Выход фракций, %	Золь- ность, А ^с , %	Выход фракций, %	Золь- ность, А ^с , %
I	0-50	2,57	55,05	1,53	54,86
2	50-63	1,92	52,64	1,85	55,93
3	63-100	5,06	52,61	7,83	55,77
4	100-160	4,96	54,43	8,15	54,10
5	160-200	2,37	54,37	6,76	54,29
6	200-315	7,17	54,20	16,23	53,71
7	315-400	4,47	53,69	9,64	53,94
8	400-630	11,87	53,09	21,04	51,33
9	630-1000	14,55	50,80	16,02	52,47
10	1000-1600	14,27	47,81	8,35	49,59
11	1600-2000	12,62	50,23	2,60	51,67
12	2500-5000	14,04	58,75	-	-
13	5000-7000	4,13	58,99	-	-


Среднее по
расчету

100,00

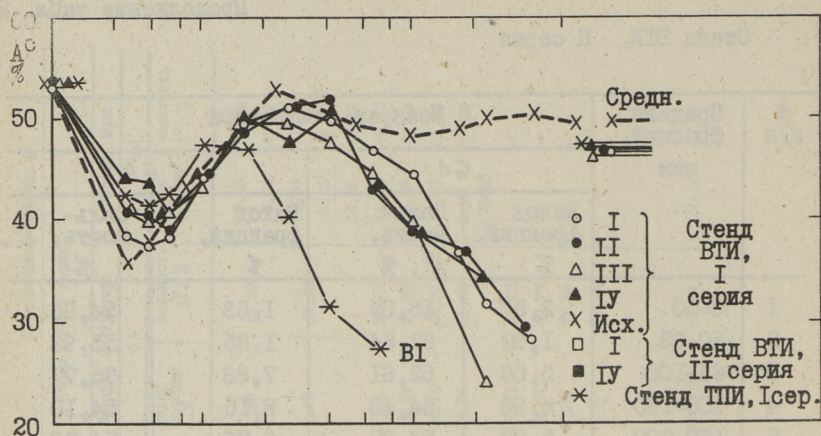
52,90

100,00

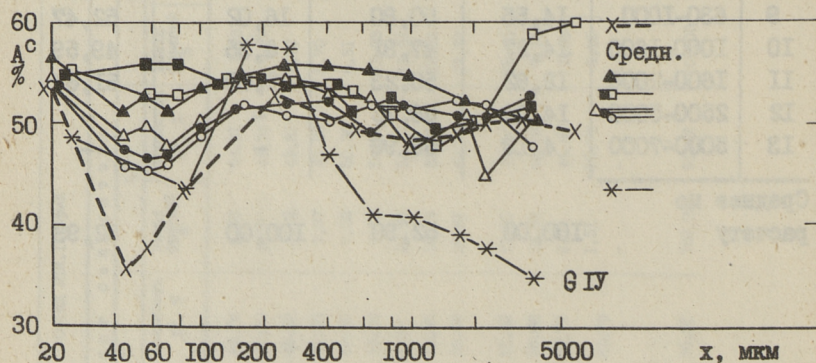
52,93

лотковой мельницы (стенд ВТИ). Изменение зольности по фракциям возвратов ступеней имеет такой же характер, как изменение зольности фракций пыли, но в возврате наблюдаются слабее выраженные -образные переходы (фиг. 3б).

Представительную оценку однородности суммарной пыли многоступенчатой установки дает направление соответствующей зерновой характеристики на логарифмически-вероятностной координатной сетке фиг. 4. Представленные на фиг. 4 данные показывают, что однородность суммарной пыли на стенде ВТИ

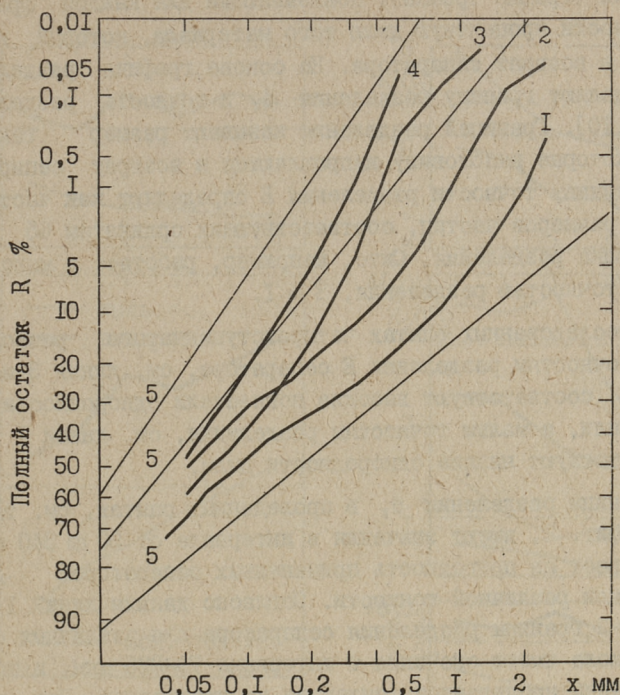


а)



б)

Фиг. 3. Зольность фракций готовой пыли (а), возврата сепаратора (б) ступеней и исходного топлива (а, б) лабораторных мельниц.



Фиг. 4. Зерновые характеристики суммарной готовой пыли лабораторного четырехступенчатого размола:
 1—стенд ВТИ, I серия; 2—стенд ВТИ, II серия;
 3—стенд ТПИ, I серия; 4—стенд ТПИ, II серия;
 5—линии преимущественного направления зерновых характеристик сланцев, измельченных в различных лабораторных и промышленных установках до различной тонкости [5, 8].

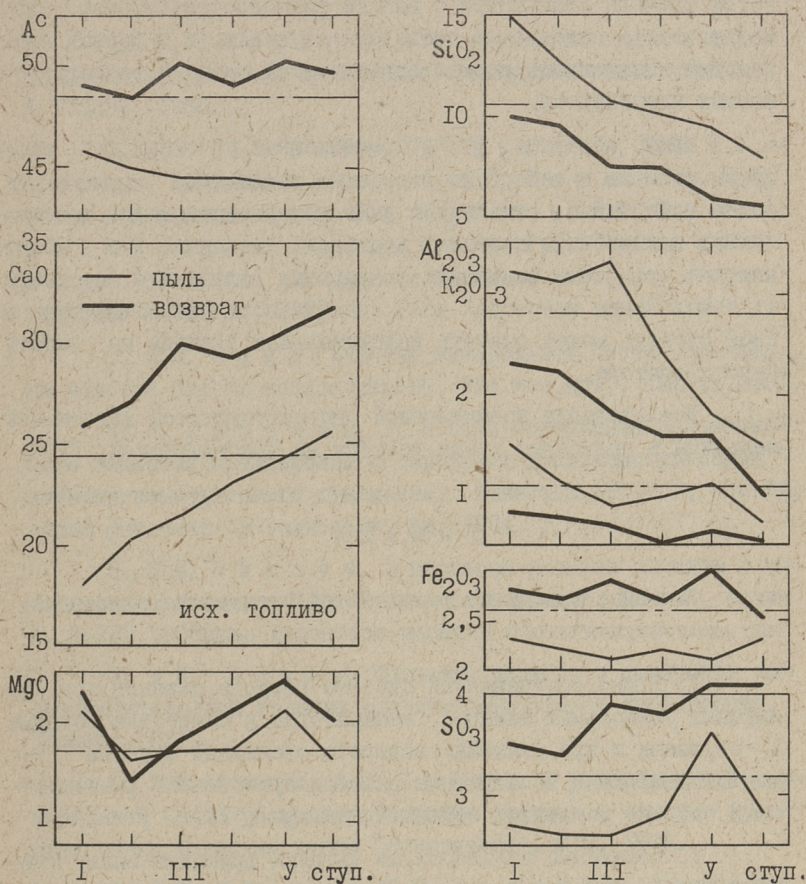
соответствует обычной однородности измельченных до такой же тонкости сланцев, см. линии 5 и 1, 2 на фиг. 4. Однородность суммарной пыли на стенде ТПИ существенно выше обычной однородности, см. линии 5 и 3, 4 на фиг. 4. Показатели однородности m готовой пыли отдельных ступеней, приведенные на фиг. 2, подтверждают высокую однородность пыли, выпускаемой со стенда ТПИ. Следовательно, при четырехступенчатом размолу сланцев существует возможность для повышения однородности пыли.

Характеристикой процесса сепарации является график разделения (график Тромпа), показывающий для каждой фракции крупности процентную долю того материала, который направляют в возврат сепаратора. На основе графика разделения определяют границу разделения d_T и точность разделения E [9, 10]. Границей разделения называют размер таких частиц, которые наполовину направляются в возврат сепаратора. Величину точности разделения E определяют как частное двух размеров частиц, соответствующих ординатам 65 и 35 % графика разделения. Сито, например, работает с максимальной точностью разделения, $E = 1$.

В исследованных опытах четырехступенчатого размола высоким точностям разделения E сепаратора, см. линии 3 и 4 на фиг. 2, соответствуют высокие показатели однородности m готовой пыли, а малым точностям разделения, см. линии 1 и 2, соответствуют низкие однородности пыли.

Границы разделения d_T в проведенных опытах, см. таблицу 1 и фиг. 2, имеют значения в интервале от 50 до 340 мкм, что указывает на пригодность примененных сепараторов для выпуска пыли различной тонкости. Согласно данным линий 1 и 2 на фиг. 2, границы разделения сепаратора для различных ступеней размола имеют значения в интервале 79–225 мкм, и по ходу ступеней наблюдается тенденция их увеличения. При первой серии опытов на стенде ТПИ, линия 3 на фиг. 2, при существенно больших значениях d_T , от 260 до 340 мкм, не наблюдается вышеотмеченной тенденции. Как известно, величина границы разделения сепаратора d_T зависит от скорости воздуха в сепараторе, от конструкции сепаратора и от состава мельничного продукта. Следовательно, увеличение d_T по ступеням размола означает, что в названных опытах для различных ступеней размола суммарное действие скорости, конструкции и качества мельничного продукта по-разному влияет на процесс сепарации. При равных скоростях воздуха и одинаковых конструкциях причиной изменения d_T должно быть различное качество мельничного продукта ступеней размола.

Представленные на фиг. 5 данные о содержании химических компонентов в пыли и возврате показывают, что в сторону последних ступеней увеличивается содержание CaO и уменьшается содержание SiO_2 , Al_2O_3 и K_2O . Содержание золы,



Фиг. 5. Содержание золы и химических компонентов в готовой пыли и возврате сепаратора по ступеням III серии опытов на стенде ВТИ и в исходном топливе I ступени.

MgO, SO₃ и Fe₂O₃ не выражают четкой тенденции изменения по ступеням. Увеличенное содержание SiO₂, Al₂O₃ и K₂O показывает накапливание кварца, гидрослюд и ортоклаза в готовой пыли первых ступеней. Следовательно, возврат сепаратора и готовая пыль последних ступеней обогащаются карбонатной частью в виде кальцита и доломита, а готовая пыль первых ступеней обогащается песчано-глинистой и органической частью, что вполне соответствует ожидаемым результатам.

Проведенный анализ подтверждает, что при многоступенчатом размоле компоненты с низкой размолоспособностью измельчаются в основном в последних ступенях, а в первых происходит интенсивный размол органической части и легкоразрушаемых компонентов.

Можно полагать, что в промышленных условиях, где процессы размолы и сепарации (особенно последний) происходят более совершенно, отмеченное выше перераспределение составляющих компонентов сланцев протекает еще ярче. Это может явиться средством выделения из горючих сланцев в процессе их измельчения некоторой доли минерального балласта, что в свою очередь может оказать положительное влияние на работу парогенератора.

Исследование промышленной многоступенчатой молотковой мельницы в настоящее время ведется на Прибалтийской ГРЭС.

В ы в о д ы

Основные выводы из результатов стендового исследования многоступенчатого размолы эстонских сланцев:

1. В многоступенчатой системе размолы сланцев при одинаковых размольных камерах, сепараторах и скоростях воздуха в ступенях и при удалении возврата последней ступени выход готовой пыли по ступеням размолы существенно уменьшается в сторону последних ступеней (см. фиг. 2).

2. Изменение зольности по ситовым фракциям пыли ступени происходит так же как по фракциям пыли обычного одноступенчатого размолы сланцев (см. фиг. 3).

3. Однородность суммарной пыли четырехступенчатого размолы сланцев на стендовых установках при некоторых режимах выше, чем однородность обычного одноступенчатого размолы (см. фиг. 4).

4. При стендовом многоступенчатом размолы сланцев происходит заметное обогащение песчано-глинистой (терригенной) частью готовой пыли первых ступеней и обогащение карбонатной частью пыли и возврата последних ступеней (см. фиг. 5).

Л и т е р а т у р а

1. К. Я. П о л ф е р о в. Установка для сушки и двух-
ступенчатого размола материалов. Авторское свидетельство
№ 130332, 1960.

2. Н. В. Ч е л и щ е в, С. В. И в а н о в, К. Я. П о л -
ф е р о в, Б. П. А л е к с е е в, А. Н. С е м е н о в, Х. О.
М е е л а к, А. А. О т с, Л. А. М а й с т е, В. Г. Т е -
р е н т ь е в, Ю. А. Х а л л и н г и Р. Г. С и л л а -
м е т с. Установка для размола топлива. Авторское свиде-
тельство № 398272, 1973.

3. И. П. Э п и к. Влияние минеральной части сланцев
на условия работы котлоагрегата. Эст. гос. изд., Таллин, 1961.

4. А. К и т с н и к, Р. К о х. Содержание органичес-
кого вещества и минералов в отдельных гранулометрических
классах измельченного кукурсита. Известия АН ЭССР, том XIII,
серия физ.-мат. и техн. наук, №4, 1964.

5. Л. М. Н и с п у у. О процессе размола сланцев в мо-
лотковых мельницах. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", серия
А, № 232, 1966.

6. А. В. П р и к к. Процессы размола и сепарации за-
балластированных горючих сланцев. Автореферат диссертации,
Таллин, 1971.

7. И. П. Э п и к, А. В. П р и к к. О распределении ми-
неральной части размолотых горючих сланцев в тонких фрак-
циях пыли. Известия вузов "Энергетика", № 9, 1971.

8. Л. М. Н и с п у у, Н. С. Р о з а н о в. Грануломет-
рические свойства измельченных материалов. Сб. "Современ-
ные проблемы механики сыпучих материалов". ЦИТИ Госком-
зага СССР, М., 1969.

9. И. П. Э п и к, А. В. П р и к к, Л. М. Н и с п у у.
Изучение работы сепаратора пылеприготовительной установки.
"Тр. Таллинск. политехн. ин-та", серия А, № 277, 1969, с. 3-
-16.

10. В. К а й з е р. Новые конструкции насыпных воз-
душных сепараторов. Сб. докладов "Тр. Европейского совеща-
ния по измельчению", М., 1966, с. 520-550.

K. Polfyorov, A. Semyonov, A. Frikk,
L. Öispuu, N. Tchelychtchev, S. Ivanov

Investigation of Multi-Stage Oil-Shale Grinding in
Laboratory Stands

The paper is concerned with laboratory stands, experimental procedure and some outcomes of the oil-shale multi-stage grinding investigation. Ash content and carbonate carbonic acid of grinding product and sieve fractions of it are under investigation. Grain composition and the results of complete chemical analysis of the grinding product are given. Separatory characteristics of the oil-shale multi-stage grinding in two different test stands are depicted.

УДК 621.18:536.33

И.Р. Микк, Т.Б. Тийкма

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ
СПОСОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПАРО-
ГЕНЕРАТОРОВ

Среди важнейших научно-технических проблем теплообмена в технологических процессах важное место занимают задачи, связанные с теплообменом излучением. Перенос энергии излучением играет существенную роль в работе тепловых энергетических установок (парогенераторов, высокотемпературных камер сгорания и т. д.).

Теоретические основы расчета переноса энергии излучением развиты довольно хорошо и возможности проведения расчетов в последнее время в связи с бурным развитием вычислительной техники расширились.

Однако, ни один из таких расчетов не возможен без использования радиационных характеристик конструкционных материалов и рабочих тел, участвующих в переносе энергии излучением.

В работах С.Г. Агабабова, Б.А. Хрусталева, И.Н. Конопелько, Э.С. Карасина, Р. Смитта, Л. Гликсмана, Н.Ф. Малкахай и др. [1...7] изучены радиационные свойства топочных шлаков и золовых отложений разного топлива и разных типов парогенераторов. Результаты этих работ показывают, что степень черноты поверхностей парогенераторов зависит от типа и химического состава используемого топлива, от температуры поверхности и от структуры отложения (кристаллического или аморфного).

Численно степень черноты золовых отложений, приведенная в этих работах, изменяется в пределах 0,35...0,95, что

значительно шире, чем приведенный в нормативном методе расчета парогенераторов [12] интервал степени черноты (0,68 ... 0,85).

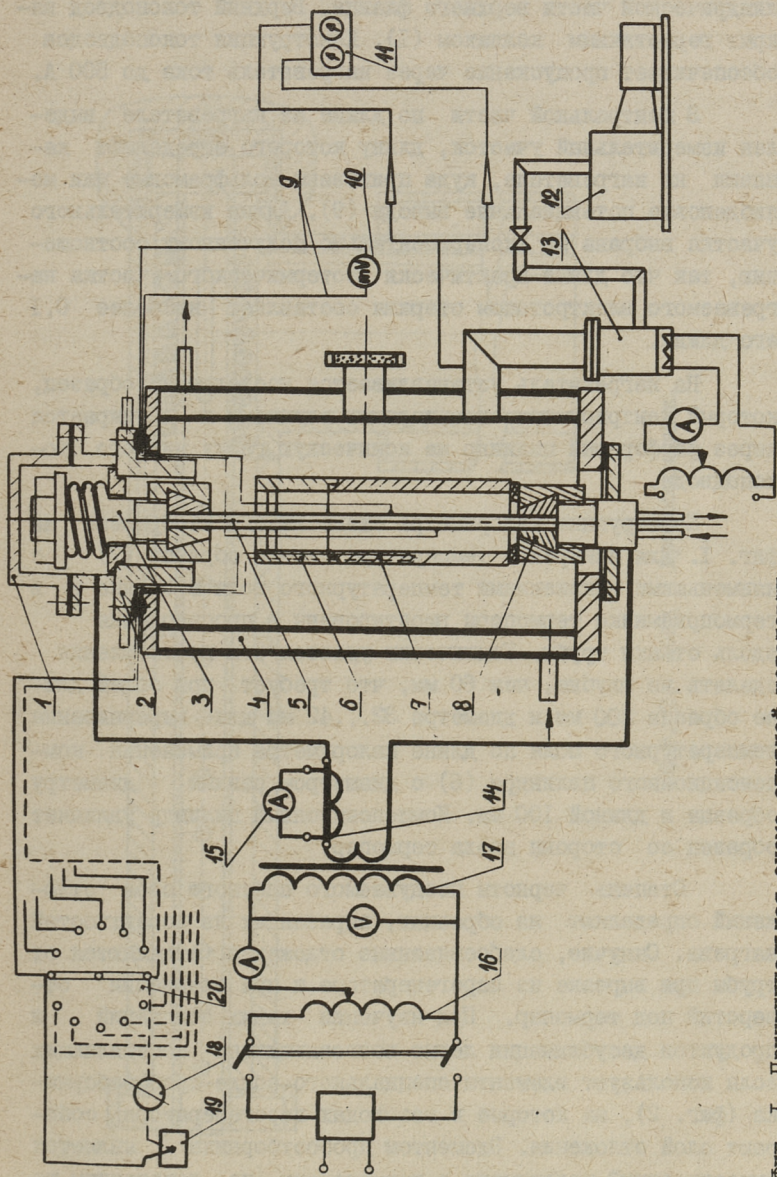
Упомянутые здесь авторы в основном изучали материал золотых и шлаковых отложений, удаленный или собранный с поверхностей нагрева и следовательно, полученные ими образцы уже не имели такой структуры поверхности, как у работающей поверхности нагрева. Однако, известно, что степень черноты поверхности сильно зависит от ее структуры и состояния, подтверждением этого являются работы С. Агабабова [8], Р. Смитта и Л. Гликсмана [6].

В данной работе рассматривают опытную установку и методику определения интегральной полусферической излучательной способности поверхностей нагрева парогенераторов. Образцами исследования являются вырезки из труб поверхностей нагрева или элементы специального пробоотборника, на которых сохранился слой золотого или шлакового отложения, возникшего в процессе работы парогенератора.

Опыты ведутся методом стационарной электрокалориметрии в интервале температур поверхности образца 700 ... 1100 К.

Основной частью установки является вакуумная печь с термостатированной (водоохлаждаемой) боковой стенкой (4, фиг. 1), внутренний диаметр которой 270 мм и высота 500 мм.

Специальные торцевые водоохлаждаемые фланцы (3, 8), которые электрически изолированы от камеры резиновой прокладкой и капроновыми втулками под болтами, образуют токоподводы, между которыми натянут вольфрамовый или молибденовый нагревательный элемент (5) в виде прутка диаметром 3...5 мм. Верхний токоподвод (3) соединен с фланцем (2) через гибкий провод между шайбой и втулкой, опирающийся на цилиндрическую пружину. Такая конструкция предотвращает прогиб нагревателя при термическом расширении. Сжатие пружины регулируется гайкой на токоподводе. Токоподводы изготовлены из меди и их контакт с нагревателем осуществляют при помощи гаек, которые при вворачивании на токоподвод прижимают медные конические сухари к торцу токоподвода и к стержню нагревателя. Охлаждение верхнего



Фиг. 1. Принципиальная схема опытной установки.

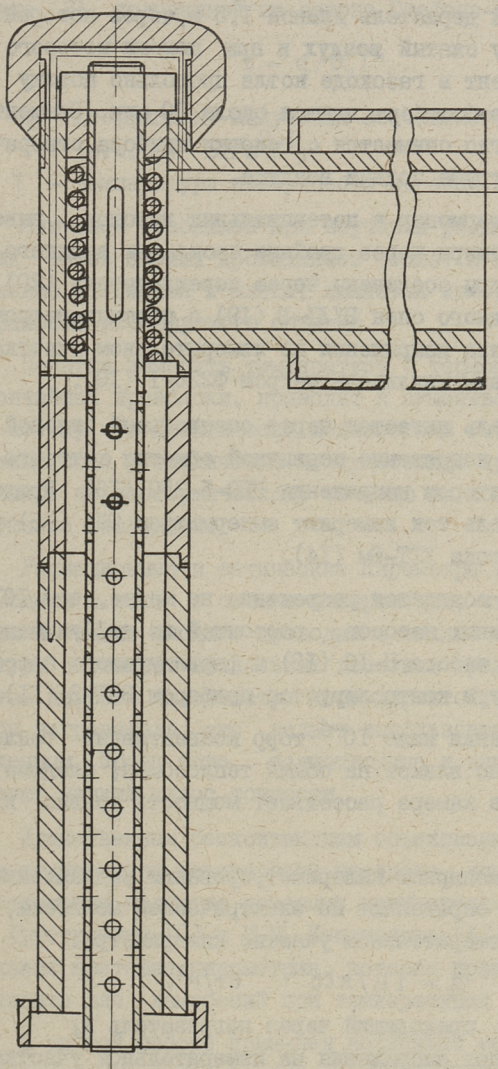
токоподвода осуществляется радиацией от последнего к цилиндрической части верхнего фланца. Верхний токоподвод закрыт герметичным колпаком (I). Конструкция токоподводов обеспечивает пропускание через нагреватель тока до 500 А.

В центральной части по длине на нагревателе выделен измерительный участок, длину которого определяют канавки на нагревателе, куда привязаны вольфрамовые или молибденовые потенциальные выводы (9). Длина измерительного участка выбрана по экспериментально полученному соотношению, так что длина практически изотермического участка нагреваемого электротокотом стержня составляет не более 0,1 его длины.

На нагреватель устанавливается исследуемый образец, который центрируется огнеупорными втулками и упирается через фарфоровый цилиндр на коническую гайку нижнего токоподвода.

Конструкция калориметра схематически изображена на фиг. 1. Для измерения температуры стенки образца (7) с наименьшими искажениями температурного поля в стенке и в термоприемнике термопары вмонтированы в просверления вдоль стенки трубы. Технически удается эти просверления сделать не глубже, чем 60 мм, что требует при общей длине образца 200 мм и диаметра 32...42 мм для выравнивания температурного поля по длине калориметра применения компенсационного цилиндра (6) с диаметром, равным диаметру образца и длиной 100 мм. Компенсационный цилиндр удлиняет образец со стороны ввода термопар.

Степень черноты несдуваемого плотного слоя отложений определяют на образцах, вырезанных из поверхностей нагрева. Сыпучие, слабосвязанные отложения отделяются от трубы при вырезке из парогенератора и при сверлении отверстий под термопар. При изучении таких отложений и продуктов десублимации легко возгорающихся составляющих зола используют элементы специального зонда-пробоотборника (фиг. 2), на которые в газоходах парогенератора собирают слой отложения. Элементом пробоотборника является вышеописанный калориметр с термопарами, по показаниям которых в процессе собирания пробы проверяется температура



Фиг. 2. Зонд - пробосторник.

стенки элемента. При помощи сжатого воздуха поддерживают эту температуру на уровне температуры стенки поверхности нагрева в районе собирания пробы. Пробоотборник имеет водоохлаждаемый держатель длиной 1,5 м, через который подается к элементу сжатый воздух и при помощи которого поддерживают элемент в газоходе котла продольно потоку газов. Процесс пробоотбора длится около 30 мин. Элемент пробоотборника легко снимается с головки прибора отворачиванием гайки на трубе подачи воздуха.

Провода термопар и потенциальных выводов выведены из вакуумной камеры через двойные прокладки верхнего фланца (2). Термопары соединены через переключатель (20) и термостат холодного спая НУЛЬ-В (19) с потенциометром ПШ-63 (18). Перепад напряжения на измерительном участке определяют цифровым милливольтметром Ф220/1 (10).

Нагреватель питается через специальный силовой трансформатор (17), напряжение первичной обмотки которого регулируется регулятором напряжения РНО-5-250 (16). Проходящий через нагреватель ток измеряют амперметром ЭЛА (15) через трансформатор тока УТТ-6м (14).

В камере создается разрежение не менее, чем 10^{-4} торр системой вакуумных насосов, состоящей из диффузионного высоковакуумного насоса Н-ИС (13) и форвакуумного насоса ВМ-461м (12). Вакуум контролируется прибором ВИТ-2 (11).

При давлении ниже 10^{-4} торр конвективный теплообмен практически мало влияет на общий теплообмен, следовательно, нагретое тело в камере рассеивает мощность только излучением.

При стационарном калориметрировании радиационный поток от образца определяют по электрической мощности, рассеиваемой на измерительном участке калориметра:

$$q = IU / \pi l d \quad \text{Вт/м}^2, \quad (1)$$

где I — ток, проходящий через нагреватель А;
 U — перепад напряжения на измерительном участке В;
 l — длина измерительного участка м;
 d — наружный диаметр образца м.

Так как боковая стенка камеры охлаждаемая и зачернена напыленным в вакууме вольфрамом, то она поглощает

практически всю падающую энергию и ее собственное излучение по сравнению с излучением образца ничтожное.

Это позволяет определить излучательную способность по формуле (2), полученной из закона Стефана-Больцмана:

$$\varepsilon = q / \sigma_0 T^4, \quad (2)$$

где σ_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела
(а.ч.т.) Вт/м²К⁴;

T — температура поверхности образца К.

Ключевой проблемой при изучении радиационных свойств тонких слоев плохих проводников тепла, к которым относятся и золотые отложения и шлаки, является измерение температуры поверхности исследуемого образца.

Попытка измерить температуру T термопарой, хотя бы и из тончайшей проволоки, приводит к существенным погрешностям, потому что практически неизвестным остается место нахождения спая и технически неосуществима прокладка проводов термопары по изотермическому сечению на поверхности без разрушения последней.

Радиационные и оптические пирометры требуют образования модели а.ч.т. в стенке калориметра, что неосуществимо в тонкой стенке плохого проводника тепла, где перепад температуры достигает нескольких десятков градусов. При данной системе нагрева калориметра дном дырчатой модели а.ч.т. был бы нагреватель, что делает использование модели бессмысленным. Кроме того, радиационные и оптические пирометры имеют низкий класс точности.

Единственным бесконтактным объективным методом измерения температуры поверхности несерого диэлектрика (золотые отложения являются несерыми излучателями, что показано Б.А. Хрусталевым [2] и И.Н. Конопелько [4]), является многоканальная цветовая пирометрия, которая практически еще слабо развита для измерений при температурах ниже 1000 К.

В данной работе применен косвенный метод определения температуры поверхности образца, который основывается на некоторых упрощающих предположениях.

Шаг по температуре между двумя последующими режимами выбирается не более 10 К. В таком интервале температур пред-

полагается, что теплофизические и оптические свойства исследуемого слоя отложений не зависят от температуры. Исходя из этого можно составить систему уравнений, описывающую радиационный перенос тепла от образца и теплопередачи через образец.

$$\left. \begin{aligned} q_i &= \varepsilon \sigma_0 T_i^4 \\ q_{i+1} &= \varepsilon \sigma_0 T_{i+1}^4 \\ q_i &= K(T_i^* - T_i) \\ q_{i+1} &= K(T_{i+1}^* - T_{i+1}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где i - порядковый номер режима опыта;
 ε - степень черноты (излучательная способность);
 K - коэффициент теплопередачи, учитывающий теплопроводность слоев отложения и окиси, а также контактные термические сопротивления между слоями, Вт/м²·К;
 T^* - температура, измеренная термопарой в стенке образца.

Систему уравнений, подобную системе (3), можно составить и для режимов i и $i-1$. Если выразить температуру поверхности образца T_i как арифметическую среднюю двух значений T_i , полученных при решении системы (3) для режимов $i-1$ и i , а также i и $i+1$, получается значение T_i , при котором учтена линейная зависимость ε и K от температуры. После алгебраических преобразований можно найти выражение для температуры поверхности T_i , в которое входят измеряемые величины q_i и T^* . Для i -ого режима:

$$T_i = \frac{1}{2} \left[\frac{T_{i-1}^* - T_i^* \frac{q_{i-1}}{q_i}}{\sqrt[4]{\frac{q_{i-1}}{q_i}} - \frac{q_{i-1}}{q_i}} + \frac{T_{i+1}^* - T_i^* \frac{q_{i+1}}{q_i}}{\sqrt[4]{\frac{q_{i+1}}{q_i}} - \frac{q_{i+1}}{q_i}} \right] \quad (4)$$

Значения T_i служат начальными приближениями при решении уравнения

$$q_i = T_i^4 \sigma_0 \sum_{k=0}^{\infty} b_k T_i^k \quad (5)$$

где b_k - коэффициенты полинома $\varepsilon = f(T_i)$;
 m - степень полинома.

Коэффициенты b_k найдены методом наименьших квадратов, используя соотношения (2), куда входят значения T_i из формулы (4). Степень полинома m определяют из условия минимума среднеквадратичного отклонения зависимости $\varepsilon = f(T)$.

Уравнение (5) решается численным методом Ньютона в отношении T_i . Это уравнение учитывает зависимость степени черноты от температуры и тем самым наиболее правдоподобно отражает исследуемое физическое явление. Следовательно, получена возможность определения излучательной способности поверхности золотого или шлакового отложения измерением температуры в стенке цилиндрического образца и теплового потока от его поверхности.

В формуле (4) содержатся комплексы типа q_{i+1}/q_i , которые близки к единице из-за малых разностей между смежными режимами опыта, что является основной идеей данной методики. Инструментальная точность измерения q является сравнительно низкой (1,5%), следовательно, появляется случайный разброс опытных данных q , что делает формулу (4) "нестабильной". Практическое применение формулы (4) возможно лишь после сглаживания опытных данных в виде $q_i = f(T_i^*)$. При этом измерение температуры считают точным (инструментальный класс точности 0,05%).

Для сглаживания необходимо представить зависимость $q_i = f(T_i^*)$ в виде полинома, полученного методом наименьших квадратов, так как известные из литературы [9,10] формулы сглаживания выбраны для постоянного шага аргумента (T^*), что не осуществимо при данной методике.

Как отмечает О.А.Сергеев [II], несмотря на недостатки, представление экспериментальных данных в виде полиномов является в настоящее время основным для теплофизических исследований.

Практика таких расчетов подтверждает, что с ростом степени полинома дисперсия ряда сначала уменьшается, проходит через минимум, а затем возрастает. Следовательно, первым приемом сглаживания является нахождение оптимальной (с минимальной дисперсией) степени полинома $q_i = f(T_i^*)$, пос-

ле этого исключают точки, которые дают среднеквадратичное отклонение больше инструментальной погрешности измерения радиационного потока q . Получают полином $q = \sum_{k=0}^m c_k T^{*k}$, рассчитанные по которому значения q входят в формулу (4).

По описанному выше алгоритму составлена программа для ЭВМ "Минск-22". Программа сглаживает опытные данные, определяет по формуле (4) начальные приближения T_i и наконец решает уравнение (5), определяя излучательную способность образца.

Практические расчеты показали, что оптимальной степенью полинома при сглаживании является $m = 2 \dots 4$ и количество точек, подлежащих исключению из-за большой дисперсии, составляет в среднем 10 % от общего количества опытных точек.

По приближенным оценкам погрешность определения излучательной способности составляет 5 %. Из этого 2 % - инструментальная погрешность (по классам точности приборов) и в среднем 3 % составляет ошибка от неучитывания при решении системы (I) температурной зависимости теплофизических и радиационных свойств исследуемого образца. Точнее всего ε определена при средних режимах опыта.

Л и т е р а т у р а

1. С.Г. Агабабов. Излучательная способность топочных шлаков. "Теплоэнергетика", № 8, 1958, с. 56-60.
2. Б.А. Хрусталева, А.М. Раков. Исследование спектральных излучательных свойств золых отложений пылеугольной топочной камеры. Двухфазные потоки и вопросы теплообмена. Изд. "Наука", М., 1970, с. 121-128.
3. В.В. Митров, И.Н. Конопелько. Исследование степени черноты золых отложений и некоторых огнеупорных материалов. "Теплоэнергетика", № 10, 1970, с. 41-43.
4. И.Н. Конопелько. Спектральная степень черноты золых отложений в топках котлоагрегатов. "Энергомашиностроение", № 11, 1972, с. 12-14.

5. А.А. Абрютин, Э.С. Карасина. Степень черноты и поглощательная способность золовых отложений в топках котельных агрегатов. "Теплоэнергетика", № 10, 1970, с. 43-46.

6. R.A. Smith, L.R. Glicksman. Radiation properties of slag. Paper Amer. Soc. Mech. Eng. No. WA/PWR-7, 1969, 12 p.

7. M.F.R. Mulcahy, J. Boorv, P.R.C. Gard. Fireside deposits and their effect on heat transfer in a pulverized fuel-fired boiler. J. Inst. Fuel, No. 4, 1969, pp. 412-419.

8. С.Г. Агабобов. Влияние фактора шероховатости на радиационные свойства тел. "Теплофизика высоких температур", № 4, 1970, с. 770-773.

9. Л.З. Румшинский. Математическая обработка результатов эксперимента. "Наука", М., 1971, 192 с.

10. К. Ланцош. Практические методы прикладного анализа. Физматгиз, М., 1961, 524 с.

11. О.А. Сергеев. Метрологические основы теплофизических измерений. Изд. стандартов, М., 1972, 154 с.

12. Тепловой расчет котельных агрегатов. "Энергия", М., 1973, 295 с.

I. Mikk, T. Tiikma

The Determination of the Total Emittance of
Fireside Deposits of Boilers

Summary

In this paper a method of laboratory determination of the total hemispherical emittance of fireside deposits of pulverized-fuel-fired boilers is carried out. The experimental technique operating under steady-state radial heat flow conditions and probe collecting technique have been described.

УДК 536.35

В. Варес. И. Микк, Т. Тийлма

ТАБЛИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ
 ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
 НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОБЪЕМА

В работах [1,2] разработаны принципы расчета теплообмена излучением в системах, заполненных полупрозрачной не-изотермической средой. Для этого предполагается, что температурное поле, а следовательно, и поле функций излучения (например, формулы Стефана-Больцмана или Планка) известны. После разложения функций излучения по направлению луча около выбранной точки в ряд Тэйлора уравнение переноса лучистой энергии упрощается и его интегрирование по членам разложения дает коэффициенты, которые зависят только от оптико-геометрических свойств среды.

В случае постоянного (усредненного) коэффициента ослабления луча, если пренебречь расстоянием, умножая эти величины на коэффициент ослабления луча $\chi = \kappa X$, и т.д., можно перейти к безразмерным координатам и линейным размерам.

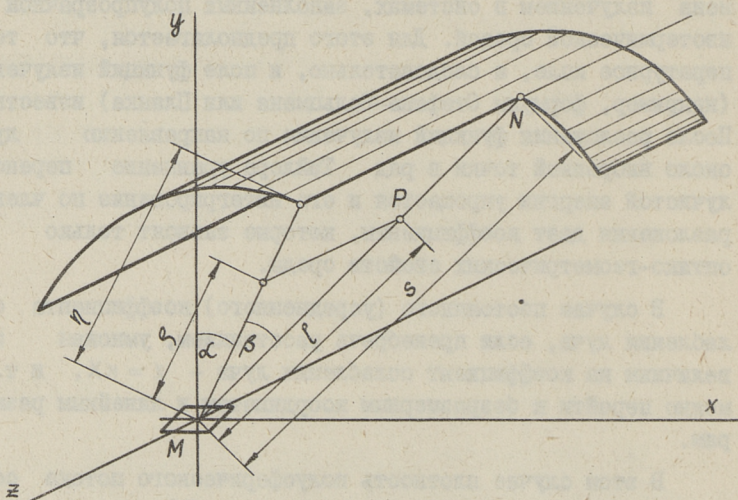
В этом случае плотность полусферического потока собственного излучения, падающего на точку (M) на окружающей оболочке, может быть определена для двухмерного поля температуры по формуле

$$\varepsilon(M)J^*(M) = \sum \mu_{ij} \varepsilon_{ij} R^{-(i+j)} J^{(i,j)}(M). \quad (I)$$

В формуле (I) $J^*(M)$ и $J^{(i,j)}(M)$ являются собственно функцией излучения и ее частными производными по относительным координатам (r_1, r_2) , характеризующим двумерное температурное поле. Функции J и $J^{(i,j)}$ определяются по темпера-

туре среды в точке (М). Относительные координаты p_1 и p_2 определяются, как отношение безразмерной координаты k безразмерной характерной длине $R(p_1/R, p_2/R)$ или как квадраты этих величин. Величина $\epsilon(M)$ — степень черноты излучающего объема, а величины ϵ_{ij} — коэффициенты неизотермичности объема. Для постоянного значения коэффициента ослабления луча k будет $\epsilon(M) = \epsilon_{00}$. Поэтому в приближенном расчете, когда используется усредненное значение

k , принимается также $\epsilon(M) = \epsilon_{00}$. Коэффициенты μ_{ij} определяются геометрией излучающей системы и выбором координатных систем. Выражения для произведений $\mu_{ij} \epsilon_{ij}$ можно получить путем сопоставления формулы (I) с выражением (см. фиг. I)



Фиг. I. Схема цилиндрической системы с обозначениями.

$$\epsilon(M) J^*(M) = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\pi} (1 - e^{-s} \sum_{m=0}^m \frac{s^m}{m!}) C_{i+j}^i \left(\frac{\partial^{i+j}}{\partial \rho^i \partial z^j} \right) \cos^{2+i} \beta \sin \beta \cos \alpha d\alpha d\beta, \quad (2)$$

где s — безразмерная длина луча;
 α, β — углы направления луча;
 C_{j+i}^i — биномиальные коэффициенты.

Коэффициенты μ_{ij} определяются из условия

$$\mu_{ij} = (\mu_{ij} \varepsilon_{ij})_{R \rightarrow \infty}. \quad (3)$$

Нередко представляется целесообразным ввести в расчет эффективную температуру и соответствующую функцию излучения J^* , которая получается из (I) делением всех членов на $\varepsilon_{00} (\nu_{ij} = \varepsilon_{ij} / \varepsilon_{00})$:

$$J^*(M) = \sum \mu_{ij} \nu_{ij} R^{-(i+j)} j^{(i,j)}(M). \quad (4)$$

Таблицы коэффициентов неизотермичности

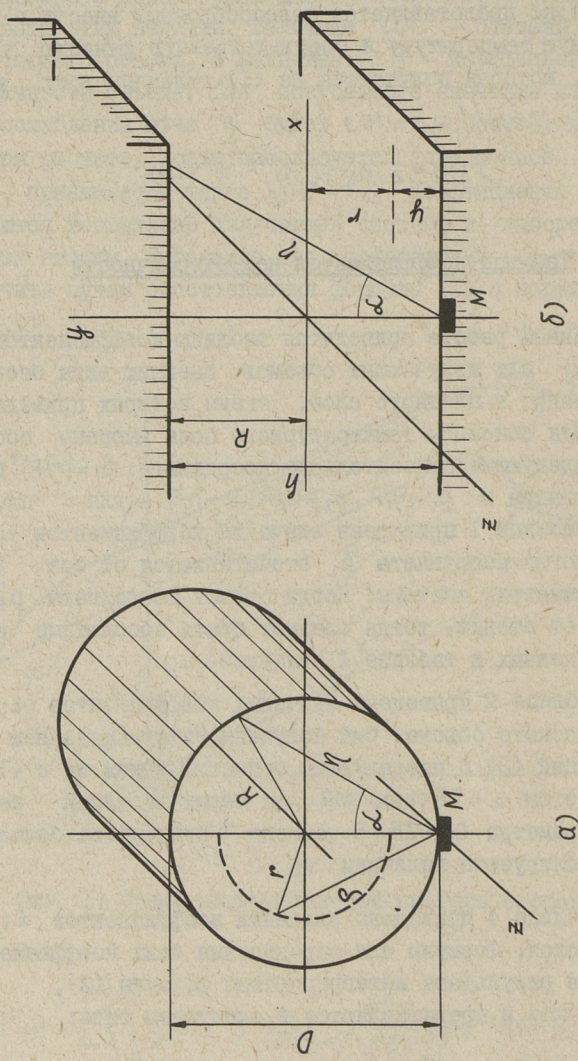
В данной работе приводятся таблицы коэффициентов μ_{ij} , ε_{ij} и ν_{ij} для излучающих объемов, имеющих виды бесконечного цилиндра и плоского слоя, схемы которых приведены на фиг. 2. Для описания температурного поля выбраны соответственно следующие относительные координаты: $p_1 = (r/R)^2$, $p_2 = z/R$ — для цилиндра и $p_1 = y/R$, $p_2 = z/R$, $R = h/2$ — для плоского слоя. В таблице I приведены значения коэффициентов μ_{ij} для случая, когда координата p_1 отсчитывается от оси (плоскости) симметрии системы. Когда отсчет координаты p_1 начинается от стенки, тогда следует брать абсолютные значения приведенных в таблице I значений μ_{ij} .

В таблице 2 приведены значения коэффициентов ε_{ij} для цилиндрического объема. Они получены интегрированием на ЭЦМ функций (2) с последующим сопоставлением их с (I) и (3). При этом $s = 2R \cos \alpha / \cos \beta$. Для малых значений безразмерного диаметра $D = 2R$. В таблице 3 приводятся более удобно интерполируемые величины $\nu_{ij} / R^{i+j/2}$.

В таблице 4 приведены значения коэффициентов ε_{ij} для плоского слоя. Формулы для определения этих коэффициентов получены в результате интегрирования формулы (2), при $s = h / \cos \beta \cos \alpha$ и представляются в следующем виде:

$$\mu_{ij} \varepsilon_{ij} = (-1)^i 2 C_{i+j}^j \sum_{m=0}^{j/2} (-1)^m C_{j/2}^m [E_{3+i}^{1+m}(0) - P_{i+j}(E_{3+i}^{1+m}(h))], \quad (5)$$

где C_{i+j}^j и $C_{j/2}^m$ — биномиальные коэффициенты.



Фиг. 2. Поперечные сечения цилиндра (а) и плоского слоя (б) с обозначениями.

Символом P_{i+j} обозначается полином

$$P_{i+j}(E_{3+i}^{1+m}) = \sum_{m=0}^{i+j} \frac{x^n}{n!} E_{3+i-n}^{1+m}, \quad (6)$$

а функции $E_k^m(x)$ определяются через известные $E_k(x)$ - функции (см. [3], с. 419), как

$$\left. \begin{aligned} E_k^1 &= E_k, \\ E_k^2 &= \frac{1}{2}(E_k + E_{k+2}), \\ E_k^3 &= \frac{1}{8}(3E_k + 2E_{k+2} + 3E_{k+4}), \\ E_k^4 &= \frac{1}{16}(5E_k + 3E_{k+2} + 3E_{k+4} + 5E_{k+6}), \\ E_k^5 &= \frac{1}{128}(35E_k + 20E_{k+2} + 18E_{k+4} + 20E_{k+6} + 35E_{k+8}). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Расчет коэффициентов ε_{ij} был выполнен на ЭЦМ по формулам (3), (5), (6) и (7) с предварительным определением функций $E_k(x)$ по рекуррентным соотношениям исходя из табличных значений функции $E_i(-x)$ [4]. Для малых значений аргумента в таблице 5 приведены величины $\nu_{ij}/R^{i+j/2}$, которые более удобно интерполируются в этой области.

Некоторые методические указания

1. Эффективность предлагаемого метода зависит от однозначности и от сходимости последовательности производных функций излучения $J^{(j)}$ в формулах (1) и (4). Желательно, чтобы эта последовательность имела хорошую сходимость или имела бы конечное число производных. Нередко могут, однако, даже очень элементарные функции не удовлетворять этому условию. Например, последовательность произведений от функции $J = p^{-1}$ вообще не сходится. В таких случаях рекомендуется предварительно аппроксимировать функцию J полиномом, имеющим конечное (и не очень большое) число производных по p .

2. Для объемов маленькой оптической плотности ухудшается сходимость формул (1) и (4) и затрудняется их исполь-

зование. Поэтому для значений оптической плотности от 0,1 до 2,0 составлены специальные таблицы 3 и 5. В предельном случае ($R = 0$) можно учесть, что поглощение лучистой энергии в объеме отсутствует и эффективное значение функции определяется как

$$J^*(M) = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} J \cos^2 \beta \cos \alpha \, d\alpha \, d\beta. \quad (8)$$

3. Для объемов большой оптической плотности сходимость формул (1) и (4) значительно улучшается. Кроме того можно для J выбирать более простые аппроксимирующие полиномы, имеющие хорошее соответствие с J только в пристенном слое с безразмерной толщиной примерно в одну единицу.

Пример

В поперечном сечении цилиндрической топки температурное поле газовой среды характеризуется параболическим законом распределения температуры от значения $T_0 = 2000$ К в центре топki до $T_0 = 1000$ К около стенки. Определить для топki с безразмерным диаметром $D = 4$ (безразмерный характерный размер $R = D/2 = 2$) эффективную температуру и собственное излучение газового объема. Предполагается, что излучение серое.

Для цилиндрического объема $p_1 = (r/R)^2$ и $T = T_0(1 - p_1/2)$.

Следовательно, для функции J получаем

$$J = \sigma_0 T^4 = \sigma_0 T_0^4 (1 - p_1/2)^4. \quad (9)$$

Дифференцирование J по p_1 дает у стенки ($p_1 = 1$) следующие выражения:

$$J^{(00)} = \frac{1}{16} \sigma_0 T_0^4, \quad J^{(40)} = -\frac{1}{4} \sigma_0 T_0^4, \quad J^{(20)} = +\frac{3}{4} \sigma_0 T_0^4,$$

$$J^{(30)} = -\frac{3}{2} \sigma_0 T_0^4, \quad J^{(40)} = +\frac{3}{2} \sigma_0 T_0^4.$$

По таблицам 1 и 2 получим:

$$\mu_{00} = +1, \quad \mu_{10} = -4/3, \quad \mu_{20} = +2, \quad \mu_{30} = -16/5, \quad \mu_{40} = +16/3,$$

Таблица I

Коэффициенты μ_{ij} для цилиндрического объема и плоского слоя

i	j	μ_{ij}		i	j	μ_{ij}	
		Цилиндр. объем	Плоский слой			Цилиндр. объем	Плоский слой
0	0	+1	+1	6	0	+1/4	+1/4
		-4/3	-2/3			-2/9	-2/9
		+2	+1/2			+1/5	+1/5
3	4	-16/5	-2/5	4	2	+5/8	+5/8
		+16/3	+1/3			-2/3	-2/3
		-64/7	-2/7			+7/10	+7/10
0	2	+1/4	+1/4	3	4	+15/32	+15/32
		-4/5	-2/5			-2/3	-2/3
		+2	+1/2			+7/8	+7/8
0	4	-32/7	-4/7	0	6	+5/64	+5/64
		+1/8	+1/8			-2/16	-2/16
		-4/7	-2/7			+7/16	+7/16
1	8	-4/7	-2/7	0	8	+7/128	+7/128

Коэффициенты ϵ_{ij} для цилиндрического объема

$$(p_1 = (r/R)^2, \quad p_2 = z/R)$$

D	$10^3 \epsilon_{00}$	$10^3 \epsilon_{10}$	$10^3 \epsilon_{20}$	$10^3 \epsilon_{02}$	$10^3 \epsilon_{30}$	$10^3 \epsilon_{12}$	$10^3 \epsilon_{40}$	$10^3 \epsilon_{22}$	$10^3 \epsilon_{04}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	377	34	2	43	0	2	0	0	9
1	596	105	11	162	1	14	0	1	52
1,5	730	186	30	304	3	40	0	4	130
2	814	265	56	439	8	78	1	11	229
2,5	869	337	86	554	16	123	2	22	335
3	905	402	119	648	26	172	4	36	435
3,5	929	458	154	721	39	223	7	54	526
4	946	506	189	778	54	272	11	75	605
4,5	958	548	224	822	70	319	16	98	672
5	966	585	258	856	87	363	23	122	727
5,5	973	617	290	882	106	403	31	147	772
6	977	645	320	902	125	440	40	172	809
6,5	981	670	349	918	144	474	49	198	839
7	984	691	376	930	164	505	59	223	863
7,5	986	710	402	940	184	532	70	247	882
8	988	727	426	948	203	557	81	271	898
8,5	989	742	448	955	222	580	92	294	911
9	991	756	469	960	240	601	104	316	922
9,5	991	768	488	964	258	620	116	337	931
10	992	779	506	968	276	638	128	357	938

Таблица 3

для цилиндрического объема

Коэффициенты ϵ_{00} и $\nu_{ij} R^{-(i+j/2)}$

D	ϵ_{00}		$10^3 \nu_{10} (R)^{-1}$	$10^3 \nu_{20} (R)^{-2}$	$10^3 \nu_{30} (R)^{-3}$	$10^3 \nu_{40} (R)^{-4}$	$10^3 \nu_{22} (R)^{-3}$	$10^3 \nu_{44} (R)^{-2}$
	94	177	373	83	221	310	38	264
0,2	177	317	371	83	310	374	51	377
0,3	251	317	369	81	422		62	383
0,4	317		367				70	374
0,5	377		365	80	457		77	368
0,6	430		363	79	484		82	364
0,7	478		361	79	505		86	361
0,8	521		358	78	521		89	358
0,9	560		356	77	533		92	353
1,0	596		353	76	542		93	348
1,1	628		350	75	548		95	343
1,2	657		348	75	552		96	337
1,3	684		345	74	555		96	330
1,4	708		342	73	556		97	324
1,5	730		340	72	556		97	317
1,6	750		337	71	555		97	310
1,7	768		334	70	552		96	303
1,8	785		331	69	548		96	296
1,9	800		328	68	543		95	288
2,0	814		325	68	538		95	281

Т а б л и ц а 4

Коэффициенты ϵ_{ij} для плоского слоя

h	$10^4 \epsilon_{00}$	$10^4 \epsilon_{10}$	$10^4 \epsilon_{20}$	$10^4 \epsilon_{02}$	$10^4 \epsilon_{30}$	$10^4 \epsilon_{12}$	$10^4 \epsilon_{40}$	$10^4 \epsilon_{22}$	$10^4 \epsilon_{04}$	$10^4 \epsilon_{50}$	$10^4 \epsilon_{32}$	$10^4 \epsilon_{14}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	5568	1719	348	1456	52	282	6	41	575	1	5	82
1	7806	4127	1546	3739	437	1352	98	373	1938	18	82	539
1,5	8865	6067	3145	5698	1273	2869	417	1135	3555	114	365	1424
2	9397	7441	4735	7145	2430	4439	1027	2232	5087	366	928	2594
2,5	9674	8364	6109	8146	3713	5835	1894	3485	6383	823	1751	3864
3	9821	8966	7205	8812	4964	6974	2925	4733	7406	1486	2752	5090
3,5	9901	9352	8035	9247	6086	7852	4015	5870	8177	2313	3828	6182
4	9945	9596	8642	9526	7030	8503	5076	6844	8739	3240	4890	7102
4,5	9969	9749	9075	9703	7793	8972	6046	7638	9140	4202	5873	7844
5	9982	9845	9376	9815	8388	9302	6893	8264	9419	5138	6738	8423
5,5	9990	9904	9584	9885	8840	9531	7603	8744	9612	6006	7471	8863
6	9994	9941	9724	9929	9175	9688	8181	9103	9742	6781	8072	9191
6,5	9997	9964	9818	9956	9420	9794	8639	9366	9830	7448	8551	9430
7	9998	9978	9881	9973	9597	9864	8995	9557	9889	8008	8926	9603
7,5	9999	9986	9923	9983	9722	9911	9266	9693	9927	8466	9213	9725
8	9999	9992	9950	9990	9809	9942	9470	9789	9953	8833	9429	9812
8,5	10000	9995	9968	9994	9870	9963	9620	9856	9970	9123	9590	9872
9	10000	9997	9979	9996	9912	9976	9730	9902	9980	9347	9708	9913
9,5	10000	9998	9987	9998	9941	9984	9810	9934	9987	9519	9794	9941
10	10000	9999	9992	9999	9960	9990	9867	9956	9992	9648	9855	9961

Таблица 4 (продолжение)

h	$10^4 \epsilon_{60}$	$10^4 \epsilon_{42}$	$10^4 \epsilon_{24}$	$10^4 \epsilon_{06}$	$10^4 \epsilon_{70}$	$10^4 \epsilon_{52}$	$10^4 \epsilon_{34}$	$10^4 \epsilon_{16}$	$10^4 \epsilon_{80}$	$10^4 \epsilon_{62}$	$10^4 \epsilon_{44}$	$10^4 \epsilon_{26}$	$10^4 \epsilon_{08}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	0	0	9	324	0	0	1	38	0	0	0	4	220
1	3	15	119	1194	0	0	22	274	0	0	0	51	838
1,5	27	98	461	2395	5	23	125	805	0	0	29	223	1751
2	112	326	1088	3708	30	99	384	1613	7	26	117	585	2832
2,5	320	752	1959	4973	106	280	846	2612	31	92	316	1157	3962
3	658	1382	2985	6098	258	606	1508	3697	90	235	665	1916	5051
3,5	1171	2181	4065	7043	527	1095	2331	4774	212	488	1175	2804	6038
4	1834	3091	5114	7803	927	1735	3252	5773	422	870	1833	3754	6893
4,5	2613	4045	6072	8395	1459	2495	4206	6656	736	1384	2606	4705	7607
5	3459	4983	6909	8944	2106	3331	5136	7404	1164	2014	3446	5607	8186
5,5	4327	5861	7612	9178	2838	4194	5999	8019	1698	2734	4310	6425	8645
6	5174	6650	8184	9422	3621	5044	6770	8610	2323	3509	5153	7142	9000
6,5	5968	7334	8640	9597	4418	5846	7436	8895	3015	4303	5950	7751	9270
7	6687	7911	8994	9722	5197	6574	7995	9189	3745	5084	6663	8255	9473
7,5	7319	8386	9264	9809	5933	7219	8454	9412	4486	5826	7296	8664	9662
8	7861	8769	9468	9870	6607	7774	8823	9577	5211	6508	7839	8989	9732
8,5	8315	9072	9618	9912	7208	8242	9114	9699	5900	7120	8296	9244	9811
9	8688	9307	9728	9941	7733	8628	9339	9787	6537	7656	8672	9439	9868
9,5	8990	9488	9808	9960	8182	8941	9512	9850	7113	8115	8976	9588	9908
10	9231	9625	9866	9974	8558	9192	9643	9896	7622	8502	9219	9700	9936

Т а б л и ц а 5

Коэффициенты ε_{00} и $\gamma_{ij} R^{-(i+j)/2}$ для плоского слоя

h	$10^4 \varepsilon_{00}$	$10^4 \gamma_{10} (R)^{-1}$	$10^4 \gamma_{20} (R)^{-2}$	$10^4 \gamma_{02} (R)^{-1}$	$10^4 \gamma_{30} (R)^{-3}$	$10^4 \gamma_{12} (R)^{-2}$	$10^4 \gamma_{40} (R)^{-4}$	$10^4 \gamma_{22} (R)^{-3}$	$10^4 \gamma_{04} (R)^{-2}$	$10^4 \gamma_{30} (R)^{-5}$	$10^4 \gamma_{32} (R)^{-4}$	$10^4 \gamma_{14} (R)^{-3}$
0,1	1838	14737	13012	9531	8106	7805	3940	4630	54156	-	-	31550
0,2	2961	13674	11635	10672	7091	8633	3350	5088	33213	1321	2356	19811
0,3	3999	13195	11039	10659	6662	8502	3126	4970	24152	1196	2282	13996
0,4	4854	12757	10499	10580	6277	8322	2928	4826	19450	1116	2202	11223
0,5	5568	12347	10001	10460	5924	8114	2747	4667	16512	1043	2118	9480
0,6	6169	11959	9536	10313	5598	7889	2580	4500	14467	976	2032	8027
0,7	6679	11590	9098	10146	5293	7654	2426	4330	12937	913	1944	7343
0,8	7114	11238	8684	9966	5006	7412	2281	4159	11735	855	1867	6618
0,9	7486	10899	8292	9776	4737	7169	2146	3988	10754	801	1771	6023
1,0	7806	10575	7919	9580	4482	6925	2018	3820	9930	751	1687	5522
1,1	8082	10262	7565	9380	4242	6683	1899	3654	9223	704	1605	5090
1,2	8321	9962	7227	9178	4015	6444	1786	3493	8606	659	1525	4713
1,3	8528	9672	6906	8975	3800	6208	1680	3335	8060	617	1448	4378
1,4	8708	9393	6599	8772	3597	5978	1581	3183	7571	583	1374	4078
1,5	8865	9124	6307	8570	3404	5753	1487	3035	7129	542	1302	3807
1,6	9002	8865	6028	8371	3222	5534	1398	2893	6726	507	1234	3561
1,7	9121	8615	5763	8174	3050	5322	1315	2756	6358	475	1168	3335
1,8	9226	8374	5510	7980	2885	5116	1236	2624	6018	444	1105	3128
1,9	9317	8142	5268	7790	2732	4916	1162	2500	5704	416	1045	2937
2,0	9397	7918	5038	7604	2586	4723	1093	2376	5413	389	988	2760

$$\varepsilon_{00} = 0,946, \quad \varepsilon_{10} = 0,506, \quad \varepsilon_{20} = 0,189, \quad \varepsilon_{30} = 0,054, \\ \varepsilon_{40} = 0,011.$$

Собственное излучение по формуле (I):

$$q_{\text{св}} = \varepsilon_{00} J_{\text{эфф}}(M) = \sigma_0 T_0^4 \left(0,946 \cdot \frac{1}{16} + \frac{4}{3} \cdot 0,506 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} + \right. \\ \left. + 2 \cdot 0,189 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{3}{4} + \frac{16}{5} \cdot 0,054 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{3}{2} + \right. \\ \left. + \frac{16}{3} \cdot 0,011 \cdot \frac{1}{16} \cdot \frac{3}{2} \right) = \sigma_0 T_0^4 (0,05912 + 0,08433 + \\ + 0,07088 + 0,03240 + 0,00550) = 0,25223 \sigma_0 T_0^4 = \\ = 0,25223 \cdot 5,67 \cdot 20^4 = 229000 \text{ Вт/м}^2.$$

Эффективную температуру получим равной

$$T_{\text{эфф}} = \sqrt[4]{q_{\text{св}} / \varepsilon_{00} \sigma_0} = \sqrt[4]{229000 / 0,946 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} = 1437 \text{ К.}$$

Л и т е р а т у р а

1. И. И. Микк, В. Померанцев. О лучистом теплообмене в канале при непостоянной температуре излучающей среды. Изв. АН Эстонской ССР. Том 19, физика, математика, 1970, № 1, с. 100-104.

2. И. И. Микк. К расчету неизотермического объемного излучения. Изв. АН Эстонской ССР. Том 22, физика, математика, 1973, № 3, с. 296-203.

3. А.С.Н е в с к и й. Лучистый теплообмен в печах и топках. Издание 2-е, исправленное и дополненное, М., 1971, 439 с.

4. Таблицы интегральной показательной функции, АН СССР, 1954.

Tables of Coefficients for the Calculation of the
Self-Radiation of the Nonisothermal Volume

Summary

In this paper tables of nonisothermal coefficients for volumes as endless cylinder and flat layer are given. Here are also offered some methodological instructions for use of the tables.

УДК 536.244:621.181.8

А.Ю. Вески, Р.А. Круус

О ТЕПЛОТДАЧЕ ТРУБНОГО ПУЧКА ПРИ АСИММЕТРИЧЕСКОМ
ОМЫВАНИИ

В теплообменных аппаратах могут встречаться случаи, когда угол входа потока в трубный пучок γ отличается от нуля, т.е. имеется дело с асимметрическим обтеканием пучка (см. схему фиг. 4). Такое направление потока имеет часто место в поверхностях нагрева, установленных на выходе из точки парогенераторов.

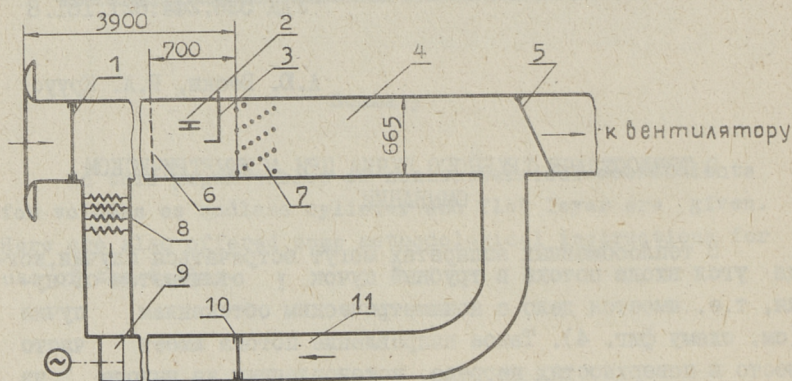
Существующие данные по конвективной теплоотдаче трубных пучков найдены для симметрического обтекания пучка, т.е. при $\gamma = 0^\circ$.

В настоящей работе экспериментально исследовали теплоотдачу коридорного трубного пучка в интервале углов входа γ от 0° до 45° при разных шагах s_1 между рядами и s_2 между трубами в ряду. Исследования проводились в диапазоне числа Re от 5000 до 25000. Конвективную теплоотдачу исследовали на моделях трубных пучков, состоящих из 14-трубных рядов, которые располагались в аэродинамическом канале. Исследовали теплоотдачу среднего ряда пучка, который состоял из калориметров регулярного теплового режима.

Калориметры общей длиной 450 мм были составлены из пяти стальных цилиндров диаметром 16 мм, которые были соединены между собой резьбовым соединением. Для измерения темпа охлаждения в сверлении по оси цилиндров закладывали хромель-нпелевые термодпары, спай которых приваривали к металлу средней части калориметров.

Аэродинамический канал (фиг. 1) состоял из основного разомкнутого канала и соединенного с его рабочей частью кругового канала. Круговой канал служил для создания потока горячего воздуха, которым подогревались калориметры

регулярного режима. Переключение рабочей части канала в открытый и круговой канал производилось при помощи шиберов (фиг. 1).



Фиг. 1. Схема опытной установки.

1-шибер I; 2-экранированная термопара; 3-трубка Прандтля; 4-рабочий участок аэродинамического канала; 5-шибер 2; 6-решетка; 7-модель трубного пучка; 8-электрические нагреватели; 9-вентилятор кругового канала; 10-шибер 3; 11-круговой канал.

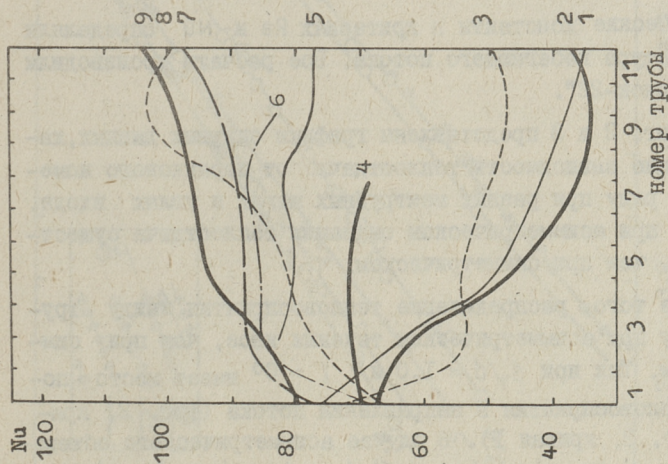
После подогрева модели до температуры 80–90 °С открывали шиберы I и 2, закрывали шибер 3 и охлаждали модель пучка при определенной скорости воздуха. При помощи многоточечного самопишущего потенциометра ЭШП-09 фиксировали температуру t калориметров, имитирующих 1-ую, 3-ю, 5-ую, 8-ую, 10-ую и 12-ую трубу среднего ряда пучка. Запись температуры труб производилась за определенные промежутки времени так, чтобы получилось 10–20 измерений в интервале температур 70–35 °С. Температура набегающего воздушного потока t_b в разных опытах была при этом –5 – +15 °С. Температура воздуха измерялась перед пучком при помощи экранированной термопары и ручного потенциометра.

Методом наименьших квадратов находили темп охлаждения в уравнении:

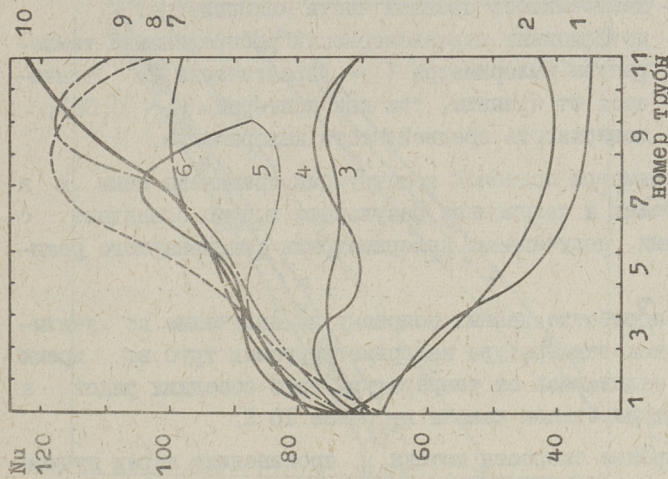
$$\ln \delta = C - m\tau,$$

где τ – время; $\delta = t - t_b$; C – константа.

Средний по периметру и длине рабочей части калориметра коэффициент теплоотдачи определялся по формуле:



Фиг. 2. Зависимость теплоотдачи от порядкового номера трубы. $Re = 12600$. $s_1/d = 10$: 1 - $s_2/d = 1,0$, $\chi = 4^\circ$; 2 - $s_2/d = 1,0$, $\chi = 0^\circ$; 3 - $s_2/d = 1,0$, $\chi = 8^\circ$; 4 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 0^\circ$; 5 - $s_2/d = 1,5$, $\chi = 8^\circ$; 6 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 8^\circ$; 7 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 15^\circ$; $s_1/d = 7,5$; 8 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 30^\circ$; 9 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 45^\circ$.



Фиг. 3. Зависимость теплоотдачи от порядкового номера трубы. $Re = 12600$. $s_1/d = 5$: 1 - $s_2/d = 1,0$, $\chi = 0^\circ$; 2 - $s_2/d = 1,0$, $\chi = 8^\circ$; 3 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 0^\circ$; 4 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 4^\circ$; 5 - $s_2/d = 1,5$, $\chi = 15^\circ$; 6 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 8^\circ$; 7 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 15^\circ$; 8 - $s_2/d = 1,5$, $\chi = 30^\circ$; 9 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 30^\circ$; 10 - $s_2/d = 1,25$, $\chi = 45^\circ$.

$$\alpha = m \frac{c}{S\psi},$$

- где c — теплоемкость средней части калориметра;
 ψ — коэффициент неравномерности распределения температуры калориметра (ψ практически не отличается от единицы, так как критерий $Bi < 0,05$);
 S — поверхность средней части калориметра.

Калориметры подобной конструкции применены нами и в других работах и полученные результаты хорошо совпадают с результатами, полученными калориметрами стационарного режима [1,2].

При обработке данных поправку на излучение не учитывали, так как температура калориметрируемых труб во время измерений отличалась от температуры труб соседних рядов и от температуры стенок канала не более 10 К.

Измерение скорости потока v производили перед пучком при помощи трубки Прандтля. Скорость потока в пучке w находили по формуле

$$w = \frac{vh}{h-nd},$$

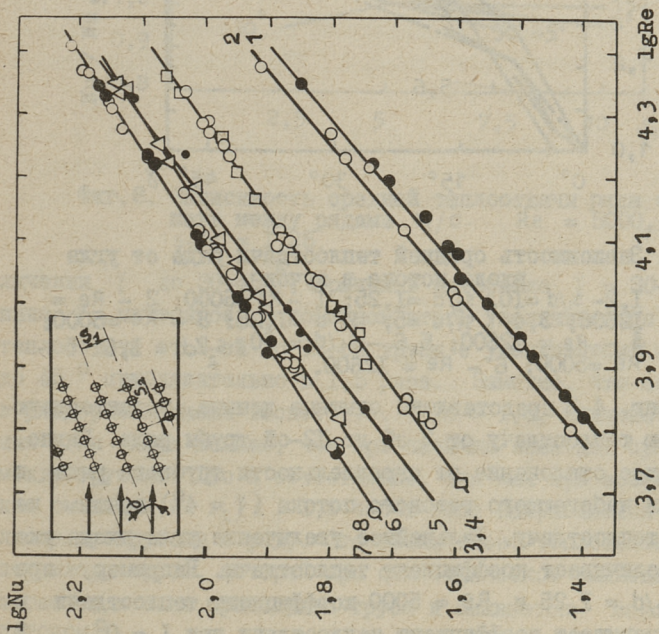
- где h — высота канала;
 n — количество рядов поперек потока;
 d — диаметр трубы.

Физические константы в критериях Re и Nu определяли при температуре набегающего потока. Все расчеты производили на ЭЦМ "Минск-22".

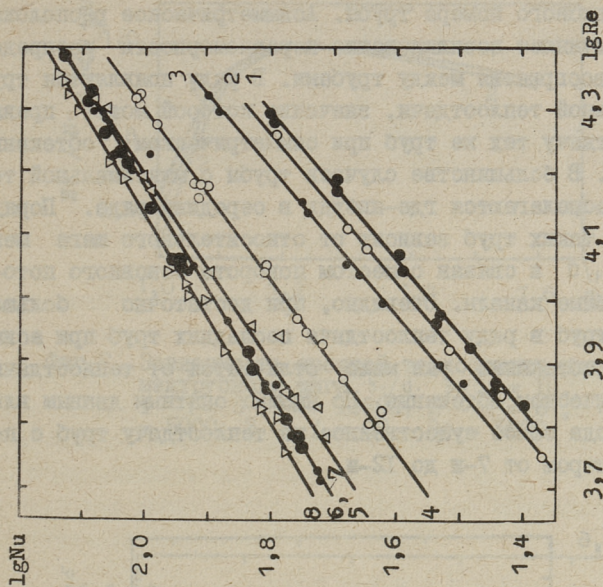
На фиг. 2 и 3 представлены графики опытных данных, характеризующие зависимость теплоотдачи от порядкового номера трубы в ряду при разных межтрубных шагах и углах входа. Видно, что при асимметрическом омывании теплоотдача существенно выше, чем при симметрическом.

Кроме того, распределение тепловосприятия между трубами в ряду при асимметрическом течении иное, чем при симметрическом. Так при $s_2/d = 1,0$ и $\gamma = 0^\circ$ имеет место понижение тепловосприятия в направлении потока (фиг. 2, кривая 2 и фиг. 3, кривая I). В случае асимметрического обтекания теплоотдача тесного ряда труб более равномерна и мало зависит от порядкового номера трубы в ряду.

Как известно, при больших межтрубных шагах s_2/d теплоотдача труб ряда начиная с третьего практически не зави-



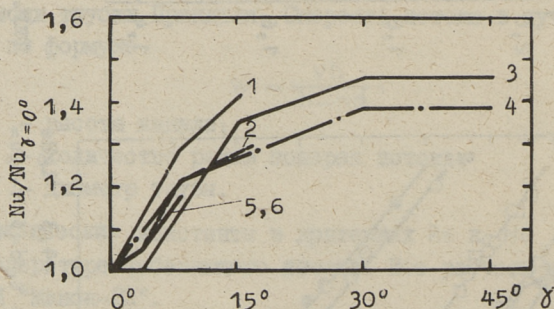
Фиг. 4. Средняя теплоотдача ряда. $s_1/d=5$: 1- $s_2/d=1,0$, $\gamma=0^\circ$; 2- $s_2/d=1,0$, $\gamma=8^\circ$; 3- $s_2/d=1,25$, $\gamma=0^\circ$; 4- $s_2/d=1,25$, $\gamma=4^\circ$; 5- $s_2/d=1,25$, $\gamma=8^\circ$; 6- $s_2/d=1,25$, $\gamma=15^\circ$; 7- $s_2/d=1,25$, $\gamma=30^\circ$; 8- $s_2/d=1,25$, $\gamma=45^\circ$.



Фиг. 5. Средняя теплоотдача ряда. $s_1/d=10$:

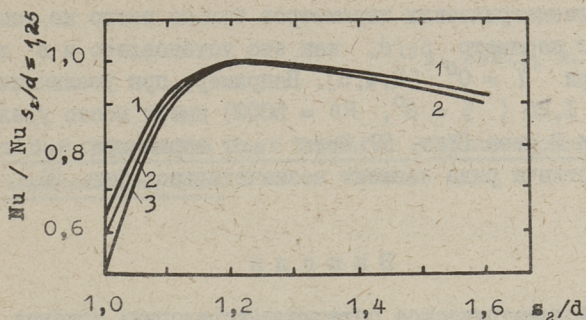
1- $s_2/d=1,0$, $\gamma=0^\circ$; 2- $s_2/d=1,0$, $\gamma=4^\circ$;
 3- $s_2/d=1,0$, $\gamma=8^\circ$; 4- $s_2/d=1,25$, $\gamma=0^\circ$;
 5- $s_2/d=1,25$, $\gamma=8^\circ$; 7- $s_2/d=1,25$, $\gamma=15^\circ$;
 $s_1/d=7,5$: 6- $s_2/d=1,25$, $\gamma=30^\circ$; 8- $s_2/d=1,25$, $\gamma=45^\circ$.

сит от порядкового номера трубы. Асимметрическое расположение труб причиняет возникновение неравномерности распределения тепловосприятости между трубами. В ряду появляются трубы максимальной теплоотдачи, значение которой может превышать теплоотдачу тех же труб при симметрическом обтекании даже дважды. В большинстве случаев трубы с максимальной теплоотдачей располагаются где-нибудь в середине ряда. Порядковый номер таких труб зависит от относительного шага между рядами s_1/d и связан с местом поворота основного потока в межтрубные каналы. Очевидно, при достаточно большом количестве труб в ряду теплоотдача последних труб при асимметрическом обтекании уже мало отличается от теплоотдачи при симметрическом обтекании. По нашим опытным данным влияние угла входа самое существенное на теплоотдачу труб с порядковым номером от 7-й до 12-й.

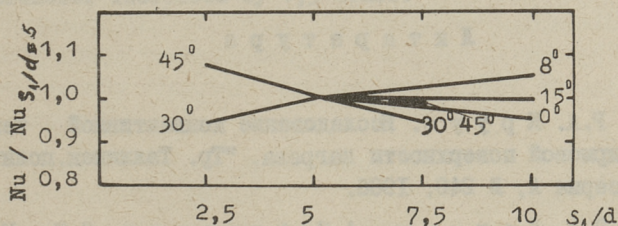


Фиг. 6. Зависимость средней теплоотдачи ряда от угла входа потока в пучок
 1, 2 - $s_1/d = 10$, $s_2/d = 1,25$: 1 - $Re = 5000$; 2 - $Re = 12600$; 3, 4 - $s_1/d = 5$, $s_2/d = 1,25$: 3 - $Re = 5000$; 4 - $Re = 12600$; 5, 6 - $s_1/d = 10$, $s_2/d = 1,0$: 5 - $Re = 5000$; 6 - $Re = 12600$.

На фиг. 4-8 представлены опытные данные, характеризующие среднюю теплоотдачу от 3-ей до 12-ой трубы ряда. Видно, что небольшое отклонение от параллельности трубного ряда и направления набегающего газового потока ($\gamma = 4^\circ$) почти не влияет на теплоотдачу. Дальнейшее увеличение угла входа уже заметно увеличивает коэффициент теплоотдачи. Например, при $\gamma = 8^\circ$, $s_2/d = 1,25$ и $Re = 5000$ коэффициент теплоотдачи в 1,3 раза превышает коэффициент теплоотдачи при $\gamma = 0^\circ$. В меньшем темпе продолжается увеличение теплоотдачи при уве-



Фиг.7. Зависимость средней теплоотдачи ряда от межтрубного шага s_2/d . $s_1/d = 10$.
 1 - $\gamma = 80^\circ$, $Re = 12600$; 2 - $\gamma = 80^\circ$, $Re = 5000$; 3 - $\gamma = 0^\circ$, $Re = 5000$.



Фиг.8. Зависимость средней теплоотдачи ряда от шага между рядами s_1/d . $Re = 5000$, $s_2/d = 1,25$.

личении γ до $30-45^\circ$, причем в интервале $\gamma = 30-45^\circ$ влияние γ ничтожное. В конечном итоге увеличивается средняя теплоотдача от 3-ей до 12-ой трубы с увеличением γ от 0° до 45° приблизительно в 1,5 раза. Заметно, что если труб в ряду расположены тесно, т.е. $s_2/d \approx 1,0$, влияние изменения угла входа меньше, чем при наличии заметных промежутков между трубами. Это и естественно, так как при асимметричном омывании и $s_2/d > 1,0$ часть газа направляется через щели между трубами в ряду. Это увеличивает теплообмен в части периметра трубы, который при симметричном омывании располагается в тени предыдущей трубы и омывается малоактивным потоком.

Из геометрических параметров больше всего на теплообмен влияет параметр s_2/d , как это установлено и в других работах при $\gamma = 0^\circ$ [3,4,5]. Например, при увеличении s_2/d от 1,0 до 1,25 ($\gamma = 8^\circ$, $Re = 5000$) имеет место увеличение Nu в 2 раза (фиг. 7). Зато от параметра s_1/d средняя теплоотдача ряда зависит незначительно (фиг. 8).

В ы в о д ы

1. Асимметрическое обтекание коридорных трубных пучков значительно увеличивает конвективную теплоотдачу.

2. Асимметрическое обтекание вызывает появление заметной неравномерности в распределении тепловосприятия между трубами в ряду. Исключением являются пучки с тесным расположением труб в ряду ($s_2/d \approx 1,0$), где наблюдается противоположный эффект.

Л и т е р а т у р а

1. Р.А. К р у с. Исследование конвективной теплоотдачи ширмовой поверхности нагрева. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", серия А, № 240, 1966.

2. В.А. Л о к ш и н, А.Я. А н т о н о в, С.И. М о ч а н, О.Г. Р е в з и н а. Обобщение данных по теплообмену при поперечном обтекании чистых гладкотрубных пучков. "Теплоэнергетика", № 5, 1969.

3. Р.А. К р у с, И.Р. М и к к. О конвективной теплоотдаче ряда труб. Известия ВУЗов, "Энергетика", № 6, 1968.

4. А.Ю. В е с к и, Р.А. К р у с, И.Р. М и к к. О конвективной теплоотдаче поперечно-обтекаемой ширмы. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", серия А, № 265, 1968.

5. А.Ю. В е с к и, И.Р. М и к к. Исследование конвективной теплоотдачи ширм при разных углах атаки газового потока. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", серия А, № 316, 1971.

About Convective Heat Transfer of Tube Banks in
Asymmetrical Flow

Summary

In this paper the results of the studies on the in-line tube bank models and the experimental technique are presented. Heat transfer was studied at different angles of the gas flow into the tube bank and at different tube pitches. It turned out that the angle being increased, the average convective heat transfer increases by 1,5 times.

УДК 621.43.037.3:621.181.7

Л.Э. Вальдма, В.А. Кудрявцев, П.К. Каллас

КОЛЕБАНИЕ РАСХОДА СПЕЧЕННЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ

Центробежные распылители используются в паровых котлах в газотурбинных и жидкостных реактивных двигателях, в химической технологии и пр.

При эксплуатации распылителей предъявляются определенные требования к точности их гидравлических характеристик. Например, ОСТ 24.836.01 [1] позволяет максимальное колебание расхода центробежных распылителей мазута $\pm 5\%$. В практике мощных тепловых электростанций такой допуск считается завышенным.

В настоящее время распылители в СССР и за рубежом изготавливают главным образом из стали механической обработкой. Имеются также данные о распылителях, изготовленных методом листовой штамповки [2]. Как показали многократные проверки, обычно заводами-изготовителями не обеспечивается требуемая точность по расходу (производительности). Например, испытания опытных партий распылителей ФМ₈₅2000 по ОСТ 24.836.01, изготовленных заводом "Ильмарине", показали на водяном стенде колебание расхода в пределах от 0 до $+10 \dots +15\%$ и во многих случаях неравномерное распределение капель в факеле. Особенно важно, что при проверке стабильности характеристик распыла после короткого периода эксплуатации наблюдалось резкое ухудшение качества распыла и увеличение расхода мазута в результате быстрого изнашивания камер завихрения и соплового отверстия [3, 4].

В Таллинском политехническом институте после длительных испытаний разработаны спеченные износостойкие распылители из твердого сплава, которые сохраняют все свои гидрав-

лические и расходные характеристики стабильными в течение года эксплуатации. Спеченные распылители изготавливают методом порошковой металлургии, при этом основными операциями являются: прессование, спекание и алмазное шлифование соплового отверстия.

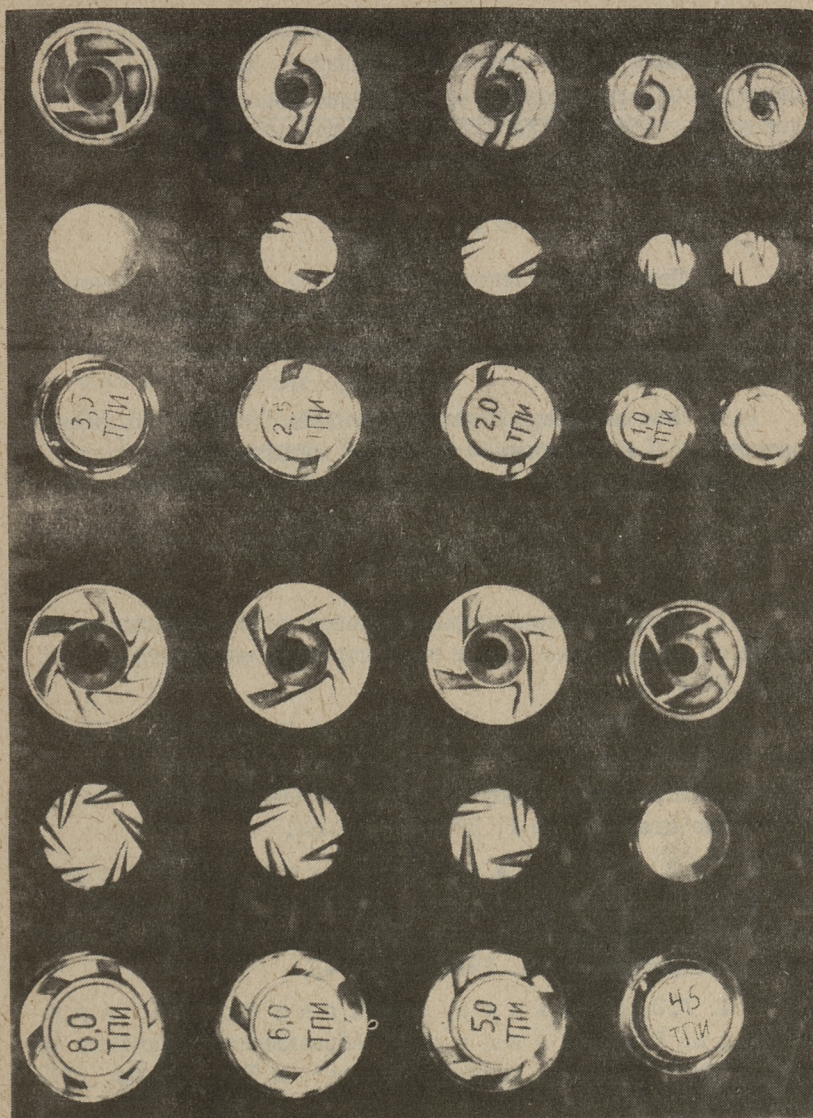
Известно [5], что колебание расхода центробежных распылителей определяется по формуле:

$$\frac{\Delta G}{G} = 1,33 \frac{\Delta d_c}{d_c} + \frac{1,34}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta_i d_{bx}}{d_{bx}} - \frac{0,67}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta_i R}{R},$$

- где d_c - номинальный диаметр сопла;
 d_{bx} - номинальный диаметр входных отверстий;
 R - номинальный размер плеча закручивания;
 Δd_c - действительное отклонение для d_c ;
 $\Delta_i d_{bx}$ - действительное отклонение для d_{bx} ;
 $\Delta_i R$ - действительное отклонение для R .

Из формулы видно, что относительный расход распылителя уменьшается при выполнении входных отверстий и плеча закручивания с отклонениями одинакового знака, что при механической обработке достичь трудно. При изготовлении распылителей методом порошковой металлургии распылитель копирует геометрию инструмента (пуансона). Отклонения геометрических размеров готового распылителя могут возникнуть главным образом за счет неравномерной усадки прессовки во время спекания. Если усадка превышает номинальную или меньше ее, то отклонения $\Delta_i d_{bx}$ и $\Delta_i R$ получают одинаковый знак, т.е. в какой-то мере эти отклонения компенсируют друг друга. Ввиду того, что сопловые отверстия распылителей всегда шлифуются, сравнивая два метода - механической и порошковой металлургии, следует, что относительное изменение расхода спеченных распылителей меньше, чем механически обработанных распылителей.

Разработанные типы спеченных центробежных распылителей производительностью 6 т/ч, 5 т/ч и 2,5 т/ч при давлении $3,5 \text{ Мн/м}^2$ (35 атм) подвергали испытанию на водяном стенде Всесоюзного теплотехнического института и на электростанциях СССР: на Конаковской ГРЭС, Литовской ГРЭС и на Лукомльской ГРЭС. Стендовые испытания показали колебание расхода



Фиг. 1. Спеченные центробежные распылители.

$\pm 3\%$, угол факела соответствовал нормали, т.е. 85° , дисперсность распыла соответствовала стандарту. Некоторые опытные партии работали в котлах электростанций в течение года и показали стабильные характеристики без обнаружения износа. Спеченные центробежные распылители показаны на фиг. I

В ы в о д ы

1. Применение спеченного твердого сплава в качестве материала центробежных распылителей позволяет повысить точность гидравлических характеристик и сохранить их стабильность в эксплуатации.

2. Опытные твердосплавные распылители имеют колебание расхода $\pm 3\%$ и сохраняют стабильные характеристики распыла в течение одного года при распыливании топочного мазута.

Л и т е р а т у р а

1. Форсунки стационарных паровых котлов. Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения. М., 1970, 97 с.

2. Л.М. Цирульников, Л.Б. Королева, А.П. Рыбаков, Ю.В. Стужин, О.А.Тасс. Штампованные центробежные форсунки для распыления мазута. "Электрические станции", № I, 1971. с. 62-64.

3. Л.Э. Вальдма, Л.Р. Паккас, Э.Х. Арумэль, Ю.Ю. Пирсо, В.А. Козьяков. Характер эрозии центробежных распылителей мазутных форсунок. Ж. "Энергомашиностроение", № 2, 1974, с. 41-43.

4. Л.Э. Вальдма, Л.Р. Паккас, Э.Х. Арумэль, В.А. Козьяков. Абразивность топочного мазута. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", № 322, Таллин, 1972, с. 79-86.

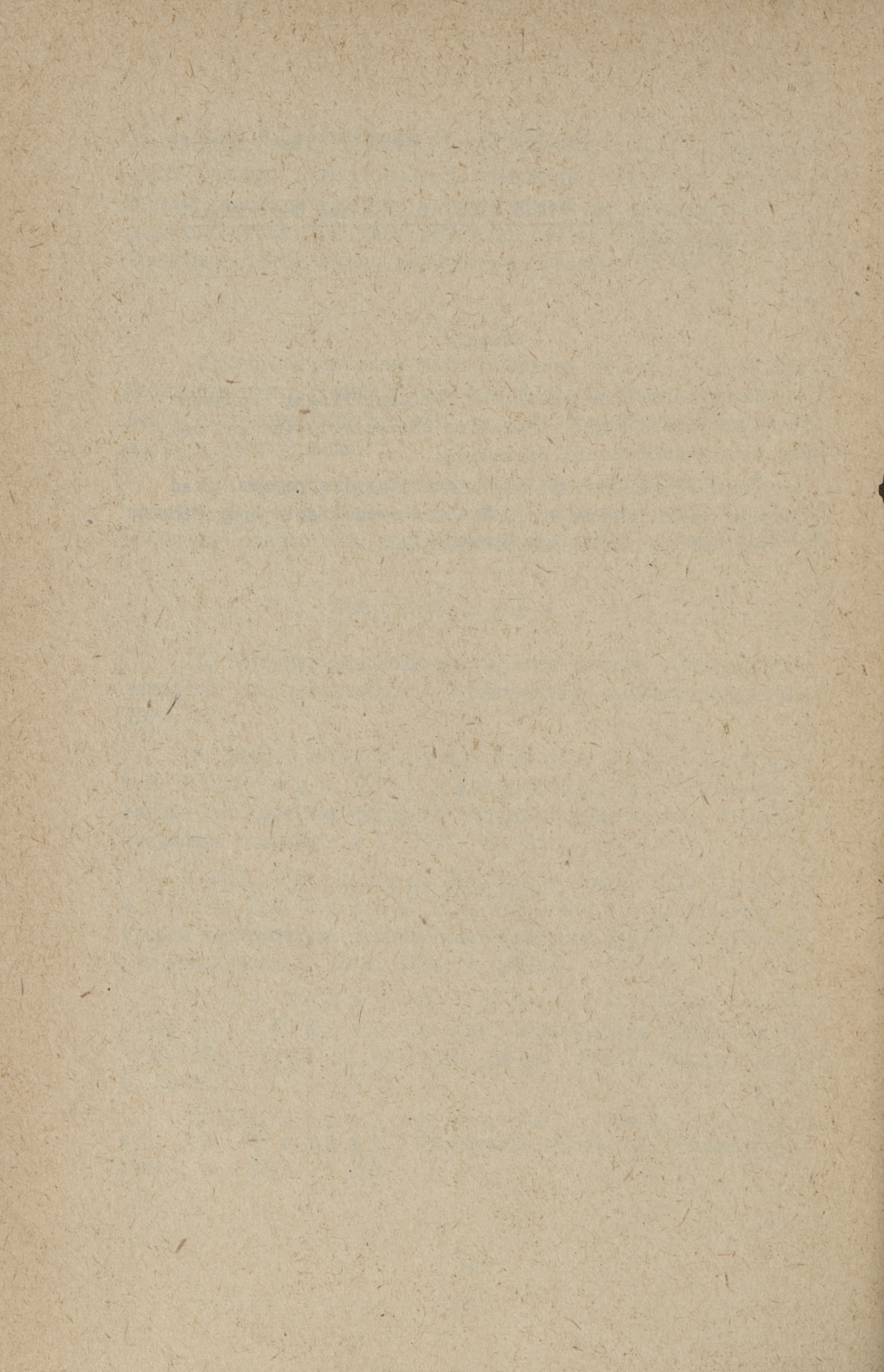
5. В.А. Бородин, Ю.Ф. Дитякин, Л.А.Клячко, В.И. Ягодкин. Распыление жидкостей. "Машиностроение", М., 1967, с. 263.

Change in the Fluid Flow of Sintered Centrifugal
Sprayers

Summary

Using cermet as a material for centrifugal sprayers allows to obtain higher hydraulic characteristics and retain them stable during operation.

The experimental sintered centrifugal sprayers had the fluid flow tolerance $\pm 3\%$ and showed stable operation during a year in atomizing black oil.



УДК 621.181.7:662.9:621.762

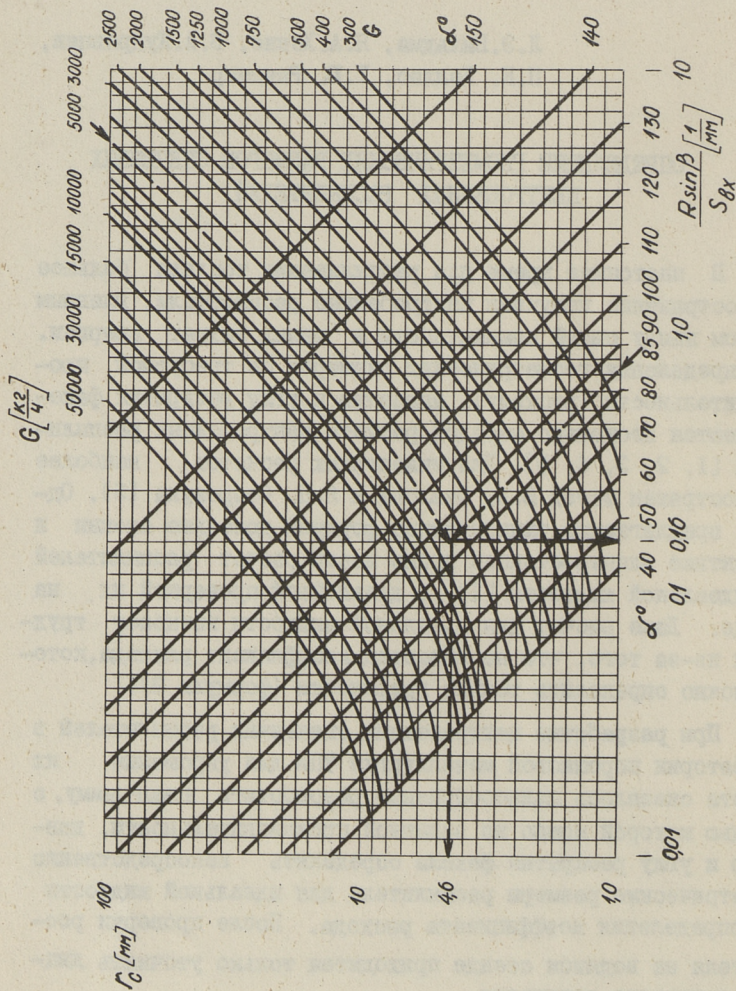
Л.Э.Вальдма, Я.А.Хенно, В.А.Кудрявцев,
П.К.Каллас, У.Ю.Рандмер

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ СПЕЧЕННЫХ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ

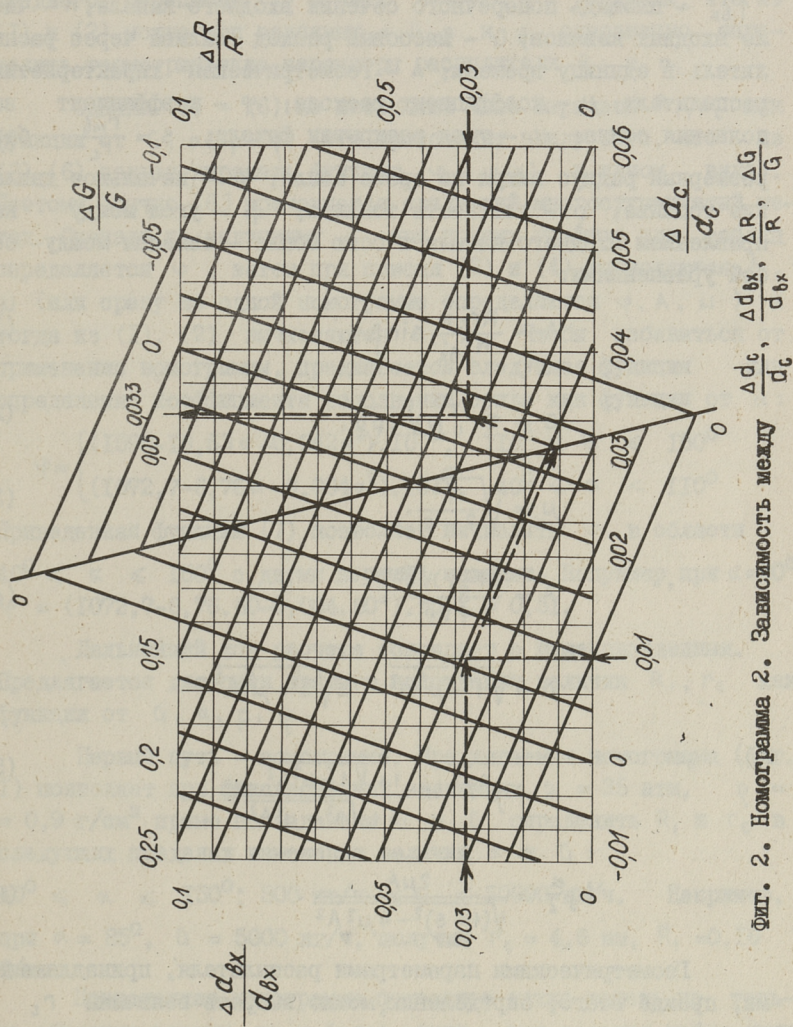
В настоящее время для распыливания топлива большое распространение получили центробежные распылители, главным образом ввиду своей компактности и малых затрат энергии. Для определения геометрических размеров по требуемой производительности (расходу), давлению и углу раскрытия факела имеются несколько методов расчета центробежных распылителей [1, 2, 3, 4, 5]. Для инженерных расчетов наиболее распространен метод В.А. Павлова и Я.П. Сторожука [5]. Однако, предлагаемые эмпирические формулы довольно сложны и в практике электростанции проще вести расчет распылителей для идеальной жидкости [1] с дальнейшей проверкой их на стенде. Даже расчет для идеальной жидкости вызывает трудности из-за того, что не известен коэффициент расхода, который можно определить только графически (формула 2).

При разработке центробежных спеченных распылителей в лаборатории порошковой металлургии ТПИ для упрощения их расчета оказалось целесообразным разработать номограмму, с помощью которой можно по заданной производительности, давлению и углу раскрытия факела определить непосредственно геометрические размеры распылителя для идеальной жидкости без определения коэффициента расхода. После проверки распылителя на водяном стенде приходится только уточнять диаметр соплового отверстия.

Кроме того, разработана номограмма для определения допусков размеров по допускаемым колебаниям расхода.



Фиг. I. Номограмма I. Зависимость между G , $\frac{R \sin \beta}{S \beta x}$, r_c , α .



Фиг. 2. Номограмма 2. Зависимость между $\frac{\Delta d_c}{d_c}$, $\frac{\Delta d_{bx}}{d_{bx}}$, $\frac{\Delta R}{R}$, $\frac{\Delta G}{G}$.

Известно [6], что параметры центробежного распылителя: R - расстояние от оси сходного канала; r_c - радиус сопла; f_{bx} - площадь поперечного сечения входного канала; n - число входных каналов; G - массовый расход топлива через распылитель в единицу времени; A - геометрическая характеристика распылителя; μ - коэффициент расхода; φ - коэффициент заполнения сопла; α - угол раскрытия факела; $s = \frac{r_{mb}}{r_c}$ - безразмерный радиус вихря на срезе сопла; p - начальное давление топлива; ρ - плотность топлива; β - угол между направлением входного канала и осью сопла - связаны между собой уравнениями:

$$A = \frac{R r_c \pi}{n f_{bx}} \sin \beta, \quad (1)$$

$$G = \pi r_c^2 \mu \sqrt{2 \rho p}, \quad (2)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\varphi^3}{2 - \varphi}}, \quad (3)$$

$$A = \frac{(1 - \varphi) \sqrt{2}}{\varphi \sqrt{\varphi}}, \quad (4)$$

$$\mu = \sqrt{1 - \mu^2 A^2} - s \sqrt{s^2 - \mu^2 A^2} - \mu^2 A^2 \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \mu^2 A^2}}{s + \sqrt{s^2 - \mu^2 A^2}}, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{2 \mu A}{\sqrt{(1 + s)^2 - 4 \mu^2 A^2}}. \quad (6)$$

Геометрическими параметрами распылителя, принадлежащими, прежде всего, определению, можно выбрать величины r_c и

$R_1 = \frac{R \sin \beta}{n f_{bx}} = \frac{R \sin \beta}{s_{bx}}$. Из формул (5) и (6) следует, что величину s можно исключить из рассмотрения, выражая ее из (6) через μ , A , α и подставляя полученную функцию $s = s(\mu, A, \alpha)$ в (5). Если после этого из (5) при помощи (3), (4) исключить μ , A , заменяя их соответствующими функциями $A = A(\varphi)$,

$\mu = \mu(\varphi)$, то получим, что коэффициент заполнения сопла φ определяется углом раскрытия α , т.е. является функцией последнего. Переписав (I) в виде $A = \pi R_1 r_c$, получим, что из (I) и (2) можно при заданных α, G, p и ρ однозначно определить геометрические параметры распылителя R_1 и r_c .

Однако (I) - (6) не позволяют явно выражать R_1, r_c как функции от G, α, p, ρ (это происходит ввиду того, что из (3)-(6) нельзя выразить функцию $\varphi = \varphi(\alpha)$ в явном виде). Поэтому обычно [6] применяется следующий многоступенчатый метод. Сначала по заданному α при помощи графика или таблиц определяется φ , затем при помощи (3) и (4) вычисляются A, μ (или сразу по одной номограмме определяются φ, A, μ) и тогда из (I), (2) вычисляются R_1, r_c . Чтобы избавиться от применения номограммы, предлагается следующая функция для определения коэффициента заполнения сопла как функция от α :

$$\varphi = \begin{cases} (1590 - 16,53\alpha + 0,042\alpha^2) \cdot 10^{-3}, & 110^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ \\ (1072,7 - 6,76\alpha - 0,004\alpha^2) \cdot 10^{-3}, & 40^\circ \leq \alpha < 110^\circ \end{cases}$$

Приведенная функция (7) позволяет вычислить φ в области $40^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ с двумя верными знаками. Например, при $\alpha = 80^\circ$ $\varphi = (1072,7 - 6,76 \cdot 80 - 0,004 \cdot 80^2) \cdot 10^{-3} = 0,51$.

Дальнейший ход расчета совпадает с вышеприведенным. Предлагается два пути прямого нахождения величин R_1, r_c как функции от G, α, p, ρ .

Первый путь - номограмма. Предлагаемая номограмма (фиг. I) позволяет при фиксированных значениях $p = 35$ атм, $\rho = 0,9$ г/см³ прямо по заданным α и G определить R_1 и r_c в следующих пределах изменения величин α и G :

$40^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$; 300 кг/ч $\leq G \leq 50000$ кг/ч. Например, при $\alpha = 85^\circ$, $G = 5000$ кг/ч, получим $r_c = 4,6$ мм, $R_1 = 0,16$ I/мм.

Приведенная номограмма позволяет также решать не только обратную задачу, но и более общую - при задании любых двух из четырех величин G, α, r_c и R_1 можно однозначно определить две остальные. Например, при $R_1 = 0,5$ I/мм, $G = 2000$ кг/ч, получим $\alpha = 110^\circ$, $r_c = 4,5$ мм.

Если величины p и ρ отличаются от значений $p = 35$ атм, $\rho = 0,9$ г/см³, то значения расхода G надо умножать на ко-

коэффициент $\sqrt{\frac{p \cdot \rho}{35 \cdot 0,9}}$ (следует из уравнения (2)).

Во-вторых, предлагаются функции, которые определяют зависимости $r_c = r_c(G, \alpha)$, $R_1 = R_1(G, \alpha)$:

$$r_c = \frac{\sqrt{G}}{100} \left[1,236 \left(\frac{\alpha}{100} \right)^7 - 116,697 \operatorname{ch} \left(\frac{\alpha}{1000} \right) + 118,23 e^{\frac{\alpha}{2000}} \right],$$

$$R_1 = \frac{1}{\sqrt{G}} \left[3,456 \left(\frac{\alpha}{100} \right)^7 + 15,374 e^{\frac{\alpha}{200}} - \frac{20,141}{e^{\frac{\alpha}{200}}} \right].$$

Величины p и ρ опять фиксированы: $p = 35$ атм, $\rho = 0,9$ г/см³ и при отличных от этих значений p, ρ расход G надо умножать на коэффициент $\sqrt{\frac{p \cdot \rho}{35 \cdot 0,9}}$. При изменении величин α , G в пределах $40^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$; 300 кг/ч $\leq G \leq 50000$ кг/ч, приведенные формулы позволяют вычислить r_c, R_1 с двумя верными знаками.

Например, при $\alpha = 85^\circ$, $G = 5000$ кг/ч получим:

$$r_c = \frac{\sqrt{5000}}{100} \left[1,236 \left(\frac{85}{100} \right)^7 - 116,697 \operatorname{ch} \left(\frac{85}{1000} \right) + 118,23 e^{\frac{85}{2000}} \right] = 4,67 \text{ (мм)},$$

$$R_1 = \frac{1}{\sqrt{5000}} \left[3,456 \left(\frac{85}{100} \right)^7 + 15,374 e^{\frac{85}{200}} - \frac{20,141}{e^{\frac{85}{200}}} \right] = 0,16 \text{ (1/мм)}.$$

Кроме того предлагается номограмма для быстрого нахождения отклонений в параметрах центробежных распылителей. Известно [6], что отклонения в параметрах центробежного распылителя связаны между собой уравнением:

$$\frac{\Delta G}{G} = 1,33 \frac{\Delta d_c}{d_c} + 1,34 \frac{\Delta d_{bx}}{d_{bx}} - 0,67 \frac{\Delta R}{R},$$

где d_c - номинальный диаметр сопла;

d_{bx} - номинальный диаметр входных отверстий;

$\Delta G, \Delta d_c, \Delta d_{bx}, \Delta R$ - действительные отклонения соответственно для G, d_c, d_{bx}, R .

Предлагаемая номограмма (фиг.2) позволяет найти значения четвертой из величин $\frac{\Delta d_{bx}}{d_{bx}}, \frac{\Delta d_c}{d_c}, \frac{\Delta R}{R}$ и $\frac{\Delta G}{G}$, если заданы произвольные три в следующих пределах изменения:

$$0 \leq \frac{\Delta d_c}{d_c} \leq 0,05; \quad 0 \leq \frac{\Delta d_{bx}}{d_{bx}} \leq 0,1; \quad 0 \leq \frac{\Delta R}{R} \leq 0,1.$$

$-0,1 \leq \frac{\Delta G}{G} \leq 0,25$. Поясним применение номограммы на примере. Пусть, например, заданы $\frac{\Delta d_{bx}}{d_{bx}} = 0,03$, $\frac{\Delta d_c}{d_c} = 0,01$, $\frac{\Delta R}{R} = 0,03$. Сначала надо из заданных параметров выбрать такие два, которые отмечены на двух соседних сторонах номограммы; в настоящем примере такими будут $\frac{\Delta d_{bx}}{d_{bx}}$ и $\frac{\Delta d_c}{d_c}$. Найдем на номограмме точку, где $\frac{\Delta d_{bx}}{d_{bx}} = 0,03$, $\frac{\Delta d_c}{d_c} = 0,01$ (при этом следует двигаться перпендикулярно соответствующим осям), и двинемся по проходящей через эту точку линии параллельно наклонной прямой (наклон вправо вниз) до пересечения прямой 0-0, откуда дальше по линии параллельно другой наклонной прямой (наклон вправо вверх) до горизонтали $\frac{\Delta R}{R} = 0,03$. Из точки пересечения проведем вертикальную прямую до оси $\frac{\Delta G}{G}$, откуда получим $\frac{\Delta G}{G} = 0,033$, т.е. 3,3 %.

В ы в о д ы

1. Номограмма 1 позволяет по заданной производительности, давлению и углу раскрытия факела определить геометрические размеры распылителя.

2. Номограмма 2 позволяет, исходя из требования по колебанию производительности распылителя назначить допустимые отклонения для геометрических размеров.

Л и т е р а т у р а

1. Г. М. А б р а м о в и ч. Прикладная газовая динамика. Гостехиздат, М., 1951.

2. З. И. Г е л л е р. Мазут как топливо. "Недра", М., 1965.

3. З. И. Г е л л е р, М. Я. М о р о ш к и н. Методика расчета и конструкция центробежных форсунок для распыления топочных мазутов. "Теплоэнергетика", № 4, 1963.

4. Камеры сжигания газовых турбин. Сб. статей под ред. Я. П. С т о р о ж у к а. ЦНИИТМ, 1969.

5. В.А. Павлов, Я.П. Сторожук. Расчет и конструирование механических форсунок. "Энергомашиностроение", № 3, 1966.

6. В.А. Бородин и др. Распыливание жидкостей. "Машиностроение", М., 1967.

L. Valdma, J. Henno, V. Kudryavtsev,
P. Kallas, U. Randmer

Determination of Geometrical Dimensions of
Sintered Centrifugal Sprayers

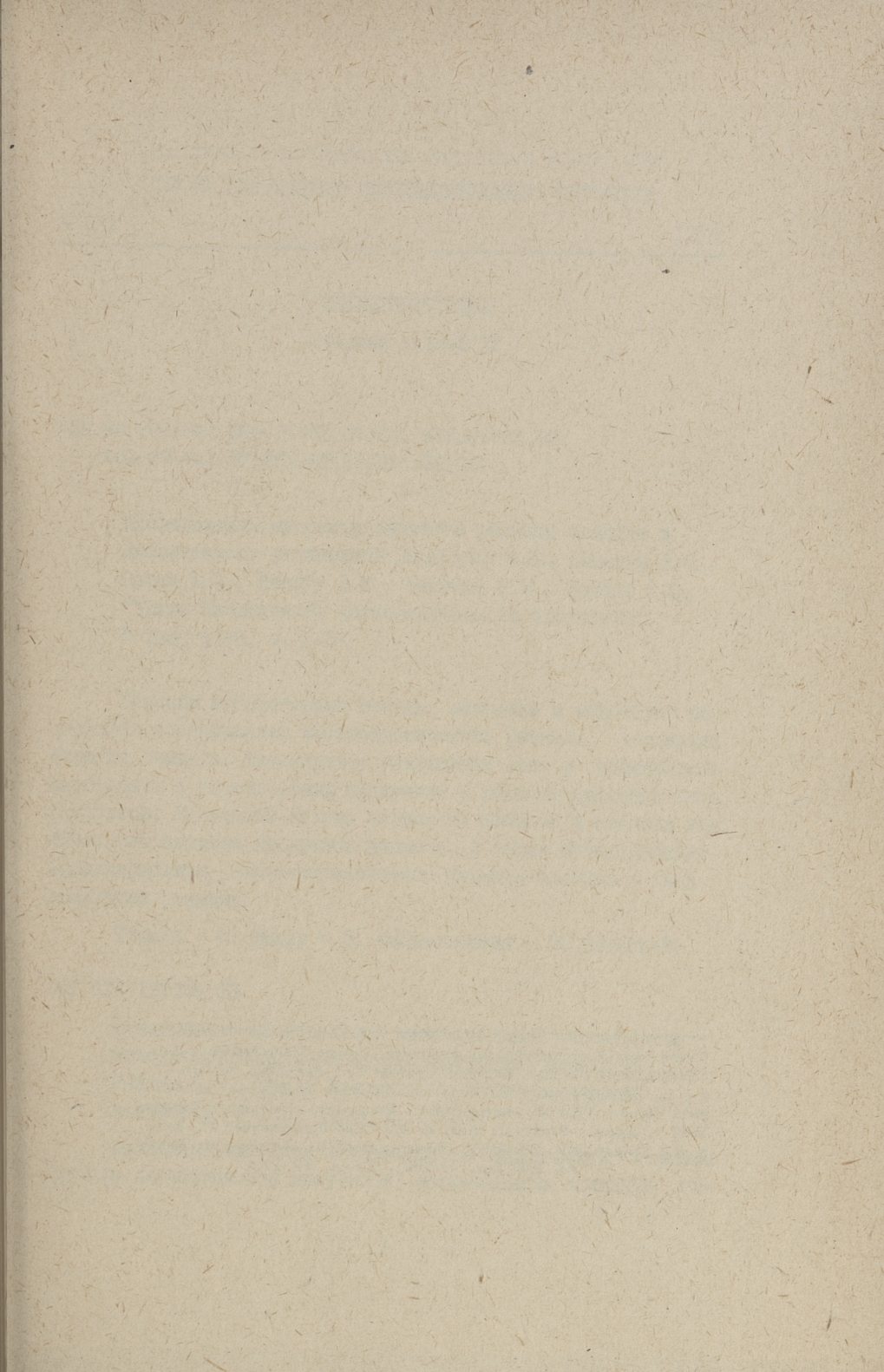
Summary

A nomograph for determining the geometrical dimensions of centrifugal sprayers has been worked out, provided the working pressure, fluid flow, angle of fluid spray and density of the fluid are known.

The second nomograph enables to determine the tolerances of the geometrical dimensions of sprayers, if the fluid flow tolerance for centrifugal sprayers is known.

С о д е р ж а н и е

1.	К. Я. Полферов, А. Н. Семенов, А. В. Прикк, Л. М. Нйспуу, Н. В. Челищев, С. В. Иванов. Исследование многоступенчатого размола сланцев в лабораторных установках.	3
2.	И. Р. Микк, Т. Б. Тийкма. Определение интегральной излучательной способности поверхностей нагрева парогенераторов	19
3.	В. А. Варес, И. Р. Микк, Т. Б. Тийкма. Таблицы коэффициентов для вычисления лучистых потоков собственного излучения неизотермического объема.	31
4.	А. Ю. Вески, Р. А. Круус. О теплоотдаче трубного пучка при асимметрическом омывании	45
5.	Л. Э. Вальдма, В. А. Кудрявцев, П. К. Каллас. Колебание расхода спеченных центробежных распылителей.	55
6.	Л. Э. Вальдма, Я. А. Хенно, В. А. Кудрявцев, П. К. Каллас, У. Ю. Рандмер. Определение геометрических размеров спеченных центробежных распылителей.	61



Таллинский политехнический институт. Труды ТПИ № 392.
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА. Сборник статей XV. Редактор Х. Лоо-
тус. Техн. редактор В. Ранник. Сборник утвержден колле-
гией Трудов ТПИ 25 марта 1975 г. Подписано к печати 9 февраля
1976 г. Бумага 60x90/16. Печ. л. 4,5+0,25 приложение. Уч.-изд.
л. 3,9. Тираж 350. МВ-01815. Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коск-
ла, 2/9. Зак. № 282. Цена 39 коп.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Сборник статей XV

УДК 66.022:621.920.8:662.67+621.928.6:662.87:
662.67+662.87:662.67:66.014:66.017

Исследование многоступенчатого размола сланцев в лабораторных установках. Полферов К.Я., Семенов А.Н., Прикк А.В., Нйспуу Л.М., Челищев Н.В., Иванов С.В. "Труды Таллинского политехнического института", № 392, 1976, с. 3-18.

Описаны лабораторные стенды, методика и некоторые результаты исследования многоступенчатого размола эстонских горючих сланцев. Исследуются содержания золы и углекислоты карбонатов в измельченных продуктах и ситовых фракциях этих продуктов. Приведены данные зернового состава и полного химического анализа продуктов размола, а также сепарационные характеристики многоступенчатого размола сланцев в двух различных стендах.

Таблиц - 2, фигур - 5, библиография - 10 названий.

УДК 621.18:536.33

Определение интегральной излучательной способности поверхностей нагрева парогенераторов. Микк И.Р., Тийлма Т.Б. "Труды Таллинского политехнического института", № 392, 1976, с. 19-29.

Приведена методика лабораторного определения степени черноты (коэффициента излучения) загрязненных золовыми от-

ложениями поверхностей нагрева парогенераторов. Описывается опытная установка, работающая в режиме стационарного радиального теплового потока, также описывается зонд-проботборник для получения проб отложений - продуктов десублимации легко возгоняющихся составляющих зола.

Фигур - 2, библиография - 12 названий.

УДК 536.35

Таблицы коэффициентов для вычисления лучистых потоков собственного излучения неизотермического объема. Варес В.А., Микк И.Р., Тийкма Т.Б. "Труды Таллинского политехнического института", № 392, 1976, с. 31-44.

Приведены таблицы коэффициентов неизотермичности излучающих объемов, имеющих виды бесконечного цилиндра и плоского слоя, а также некоторые методические указания для вычисления лучистых потоков при помощи предлагаемых таблиц.

Таблиц - 5, фигур - 2, библиография - 4 названия.

УДК 536.244:621.181.8

О теплоотдаче трубного пучка при асимметрическом омывании. Вески А.Ю., Круус Р.А., "Труды Таллинского политехнического института", № 392, 1976, с. 45-54.

В статье приведены результаты исследования модели коридорного трубного пучка и методика эксперимента. Теплоотдачу исследовали при разных углах входа газа в трубный пучок и при разных межтрубных шагах. Выяснилось, что при увеличении угла входа средняя конвективная теплоотдача пучка увеличивается до 1,5 раза.

Фигур - 8, библиография - 5 названий.

УДК 621.43.037.3:621.181.7

Колебание расхода спеченных центробежных распылителей. Вальдма Л.Э., Кудрявцев В.А., Каллас П.К. "Труды Таллинского политехнического института", № 392, 1976, с. 55-59.

Приводятся данные о возможности повышения точности и стабильности гидравлических характеристик, в частности, колебания расхода с помощью применения в качестве материала распылителя спеченного твердого сплава.

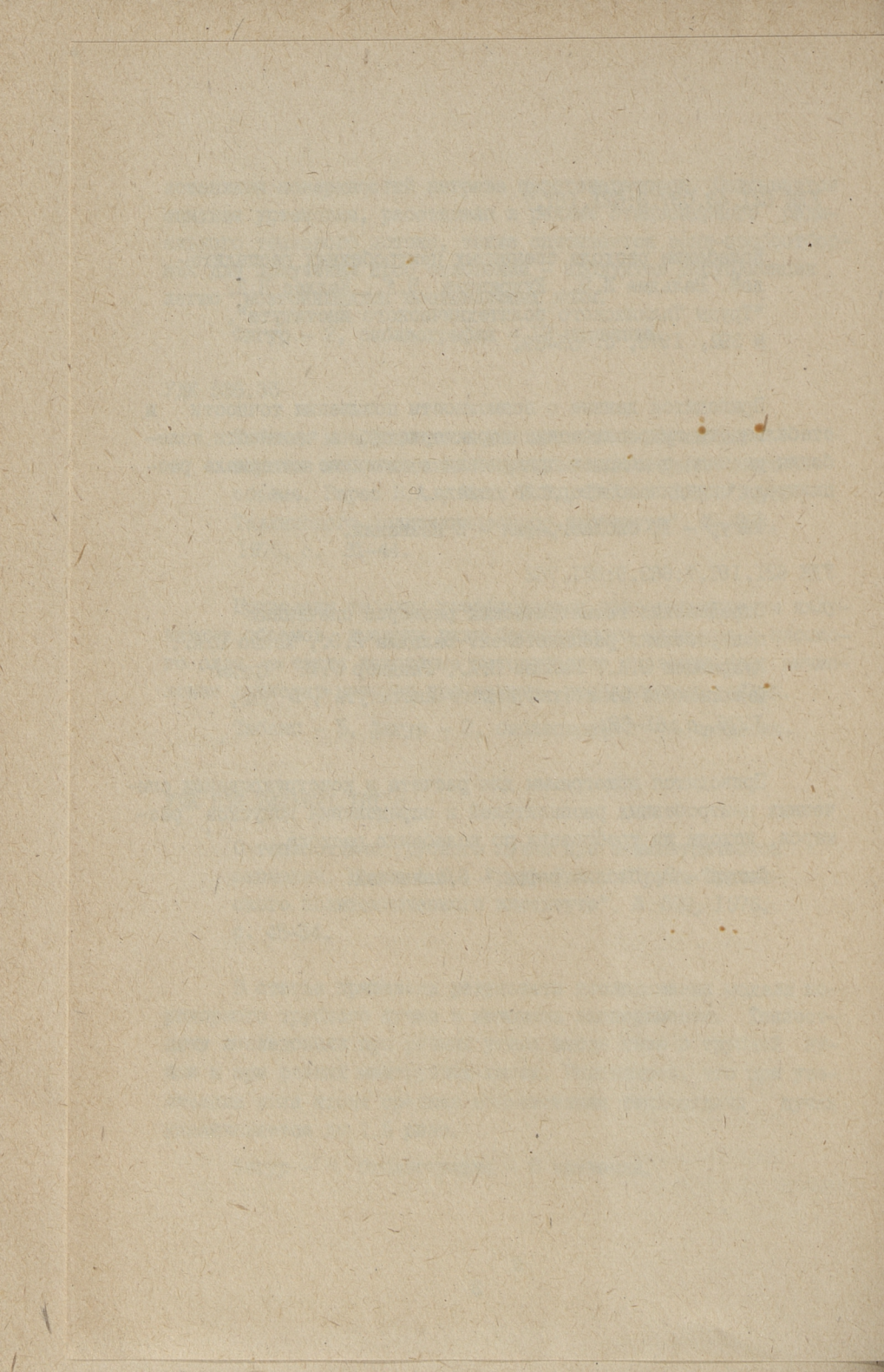
Фигур - 1, библиография - 5 названий.

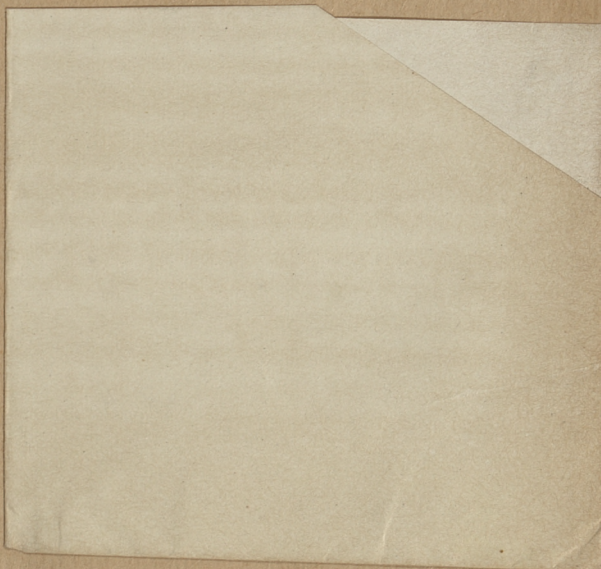
УДК 621.181.7:662.9:621.762

Определение геометрических размеров спеченных центробежных распылителей. Вальдма Л.Э., Хенно Я.А., Кудрявцев В.А., Каллас П.К., Рандмер У.Ю. "Труды Таллинского политехнического института", № 392, 1976, с. 61-68.

Приводятся номограммы для расчета и конструирования спеченных центробежных распылителей и определения допусков размеров, исходя из требования по колебанию расхода.

Фигур - 2, библиография - 6 названий.





Цена 39 коп.

12