ISSN 0136-3549 0320-3360



TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

Fp.6.

800 ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

> ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ







TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.18:662

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Теплоэнергетика XX1X

Таллин 1985



ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ Труды ТПИ № 600.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. Теплоэнергетика XX1X.

На русском языке. Редактор В. Ратник. Техн. ред. М. Тамме. Сборик утвержден коллегией Трудов ТПИ 26.03.85. Подписано к печати 01.08.85. МВ-08604. Формат 60х90/16. Печ. л. 6,75 + 0,25. Уч.-изд. л. 5,3. Тираж 400. Зак. № 354. Цена 80 коп. Таллинский политехничёский институт, 200026 Таллин, Эхитаяте теэ, 5. Ротапринт ТПИ, 200006 Таллин, ул. Коскла, 2/8.

C

Таллинский политехнический институт, 1985

№ 600

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED TPYJH TALLINHCKOFO HOINTEXHNYECKOFO NHCTVITYA

> УДК 662.67.002.01 Х.Х. Арукюла, Л.М. Ыйспуу

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ МЕСЯЧНЫХ И СУТОЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЛАНЦА НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Статистический анализ эксплуатационных данных Прибалтийской и Эстонской ГРЭС, ПО "Эстонсланец" и "Ленсланец" представляет интерес для сравнения точности определения показателей и оценки влияния случайных факторов (динамика изменения параметров топлива и воздуха и др.) на эффективность эксплуатации электростанции (к.п.д. котлов, удельный расход топлива, себестоимость электроэнергии и др.).

Исследование динамики изменения среднегодовых показателей качества сланца за 1960...1981 гг. позволило изучить причины и характер нестабильности показателей по поставщикам и электростанциям Эстонглавэнерго [1, 2].

Статистическая оценка месячных и суточных показателей электростанций за период времени с I января 1976 года по 31 декабря 1981 года показала, что качество сланца на Прибалтийской ГРЭС более стабильное, чем на Эстонской ГРЭС [3].

Начальные данные для анализа были получены из месячных отчетов и журналов отчета суточных показателей ГРЭС, ПО "Эстонсланеп" и "Ленсланец".

Спецификация использованных факторных признаков X и результативных признаков Y приведена в таблице I, а средние значения \overline{X} , стандартные отклонения σ и коэффициенты вариации V за 1982 г. в таблице 2 [2].

Данные обрабатывались на ЭВМ ЕС-1022 по программам определения статистических оценок и пакета программ СТАТОС для выявления зависимостей.

По данным за 1976...1982 гг. [1] (таблица 2) коэффициенты вариации показателей расхода сланца и потенциального тепловыделения топлива (V = 8...18 %) значительно больше, чем

Таблица I

Обозначение факторов

Ж П/П	Фактор	бозначение
I.	Удельная теплота сгорания по бомбе су- хого сланца по данным электростанции, _э Q ₆	Χ1
2.	Удельная теплота сгорания по бомбе	
2	сухого сланца по сертификатам, с Сб	×2
0.	поэщициент вариации суточных показате-	
	сухого сланиа. Ус	X2
4.	Массовая доля рабочей влаги сланца по	S n Ronolau
	данным электростанции, _э W ^P	X4
5.	Массовая доля рабочей влаги сланца по	Kaparesel n
	сертификатам, с ^{WP}	X5
6.	Удельная теплота сгорания рабочего топ-	ENONE ATOON
~	лива по данным электростанции, эСн	X ₆
7.	Удельная теплота сгорания рабочего топ-	arooN
0	лива по сертификатам, с	X 7
0.	Расход сланца, G	× 8
э.	DECTORE CIENTE V.	Xa
IO.	Расхол сланиа со склала. С	X
II.	Потенциальное тепловыделение. G.	X
I2.	Температура холодного воздуха, поступающего	BOI ROUMOD
	в котлы электростанции, Т _{хв}	X 12
I3.	Расход мазута, G _м	X 13
I4.	Коэффициент полезного действия котла	acterto xa
	(брутто), Лк	Y ₁
15.	Удельный расход условного топлива на от-	Cnema
TO	пуск электроэнергии, суут	Y ₂
10.	выраоотка электроэнергии, Е	Y ₃
17.	отпуск электроэнергии на сооственные	
TR	пужцы, Ссн	14 V-
19	Отпуск тепна	1/nn /5
20.	Использование установленной молности. 1	16
21.	Коэффициент использования установленной	UBIX OF
	мощности, 17 н	Y ₈
22.	Себестоимость электроэнергии, Сэ	Y,
23.	Себестоимость теплоэнергия, Ст	Y 10

влажности сланца (V = I...9%) и удельной теплоты сгорания сланца (V = 0,5...3%), что нужно учитывать при планировании управления качества сланца. При этом, как правило, коэффициенты вариации показателей качества по сертификатам, при проверке по статистической гипотезе сравнением дисперсий F-критерием, значимо меньше, чем по данным электростанции (таблица 2). Более высокая точность определения показателей качества сланца в лабораториях ПО "Эстонсланец" и "Ленсланец" (по сертификатам) объясняется и большим числом проб (6500 за 1982 год), что примерно в 6...7 раз больше, чем на электростанциях (при равном количестве сланца).

По основным результативным признакам максимальный коэффициент вариации (V = 3, 4...4, 6%) имеет себестоимость электроэнергии (фактор Y_9), а малые коэффициенты вариации (V = 0, 2...I, 2%) коэффициента полезного действия котлов (фактор Y_1) и удельного расхода условного топлива на отпуск электроэнергии (фактор Y_2) – затрудняют статистический анализ.

Исследованием временных рядов месячных показателей электростанций за период 1976...1982 годы выявлены зависимости от времени года по факторам $X_8, X_{10}, X_{11}, X_{12}$ (фиг. I) и результативным признакам $Y_1, Y_2, Y_3, Y_6, Y_8, Y_{10}$ и наличие цикличного тренда периодом один год (фиг. I, 2).Для уменьшения влияния пикличного тренда можно вывести средние показатели отдельно для летнего (с мая по сентябрь) и зимнего (с октября по апрель) периодов.

Для общей представительности данных необходимо соблюдать годичную периодичность месячных показателей (т = = 12, 24, 36 ... месяцев). Более высокие коэффициенты корреляции для большинства показателей наблюдаются за I и 2 года, а изменение режима работы электростанции снижает коэффициенты корреляции за 3 и более года. Вследствие этого и введения новых оптовых цен на сланец и оборудование с 0I.0I.1982 г. сосредоточим основное внимание на данные корреляционного анализа месячных показателей за 1982 год.

По графу цути максимальной корреляции (фиг. 3) для Прибалтийской ГРЭС на центральном месте находится фактор X_8 – расход сланца, который имеет тесную связь с фактором X_{11} – потенциальное тепловыделение ($r_B = 0,99$), Y_4 – отпуск









блица

E E

N

Статистические оценки месячных показателей за 1982 п

		Прибалти	ИСКАЯ ГРЭС	1 2 2 2	1 3c	тонская ГРЭС	
Фактор	Ед. изм.	×	Ь	>	×	ь	>
Ι	2	3	4	5	6	4	8
X1 aQ6	MIJK/KL	II,28	0,16	I,4I	60°II	0,13	I,I3
X2 cQ5	MIJ#/KL	II,33	0,05	0,46	II,08	0,06	0,51
X3 Va	29	I,84	0,44	23,12	2,76	0,66	23,9
X4 aWP	%	I2,33	0,21	1,67	10,8I	0,56	5,18
X5 cWP	20	10,77	60*0	0,82	10,96	0,II	I,00
Xe aGH	MJJ#/KL	8 , 8I	0,11	I,29	8,87	0,13	I,46
X7 cQH	МДж/кг	6,07	0,05	0,56	8,87	0,12	I,35
X8 Gc	10 ³ T	983,2	1,e8	9,06	965,2	80,4	8,33
X ₉ V _G	R	I5,46	4,15	26,84	I2,67	3,88	30,6
X10 Gck	10 ³ r	58,0	27,7	47,71	43,14	29,5	68,4
X11 GT	IO ³ TAW	8,66	0,76	8,78	8,56	0,69	8,05
X12 Txb	K	277,8	8,4	3,03	277,8	8,4	3,02
X13 GM	т у.т.	2788	896	32,09	620,8	245	39,5
Y, 71×	89	82,37	0,47	0,57	81 °77	0,59	0,72

-	2	And a state of the second					
and an and an and a state		· 0000					
Q _{4T}	r/kBr . u	429	5,I	I,I8	407	0,85	0,21
ч	ТВт.ч	2.117	70,8	9*95	778,5	6I,6	16.7
d, ch	20	IO,03	0,74	7,33	77,7	60*0	I,16
4	KBT .4/T	5,62	0,14	2,58	6,45	0,12	I,86
Q _T	10 ³ Гкал	111,6	50,5	45,25			
t Z	час	496	49	9°°6	483,7	38,2	7,89
N La	Pe	67,92	6,17	9,08	65,28	5,3I	8,0I
°,	коп/кВт.ч	I,004	0,034	3,43	0,88	0,04	4,55
C1	py6/Гкал	5,746	0,502	4I'6	4,IO	0,13	3,17

8

чоэффициенты вариации.

электроэнергии на собственные нужды ($r_B = 0.98$) и X_9 - коэффициент вариации суточного расхода сланца ($r_B = -0.72$), последний фактор, в свою очередь, влияет на результирующий признак Y_1 - коэффициент полезного действия котлов ($r_B = 0.61$). Фактор X_{11} - тесно связан с результирующими признаками Y_7 - использование установленной мощности ($r_B = 0.96$) и через него Y_3 - выработка электроэнергии ($r_B = 1.00$).

По Эстонско[#] ГРЭС (фиг. 4) на центральном месте находится также фактор χ_8 , который имеет тесную связь с факторами $\chi_{_{\rm H}}$, ($\Gamma_{_{\rm B}} = 0.98$), χ_9 ($\Gamma_{_{\rm B}} = -0.78$), Y_8 – коэффициент использования установленной мощности ($\Gamma_{_{\rm B}} = 0.95$) и себестоимость электроэнергии Y_9 ($\Gamma_8 = -0.63$).

По данным за 1979...81 год факторы X_8 и X_{11} имеют тесную связь столь естественно и с фактором Y_7 - использование установленной мощности ($r_8 = 0.99$) и через него с фактором Y_3 - выработка электроэнергии ($r_8 = 0.97...0.99$), а фактор Y_8 связан с результативным фактором Y_2 - удельный расход условного топлива ($r_8 = 0.54...0.71$), который, в свою очередь, связан с фактором X_2 - удельная теплота сгорания сланца ${}_{c}Q_{5}^{c}$ ($r_8 = -0.64...-0.78$). Результативным признаком - фактором Y_1 - к.п.д. котлов - связаны факторы X_1 - удельная теплота сгорания сланца ${}_{9}C_{5}^{c}$ ($r_8 = 0.55...$ 0,71) и X_{12} - температура холодного воздуха, поступающего в котлы ($r_8 = 0.71...0.80$).

Результать регрессионного анализа сланиа месячных показателей Прибалтийской ГРЭС (табл. 3) показывают, что к.п.д. котла – Y_1 зависит от факторов X_9 , т.е. вариации показателей расхода сланца и X_{10} – расхода сланиа со склада электростанции. Повышение расхода сланца со склада электростанции на 10 тыс. т в месяц повышает к.п.д. котлов на 0,1 %. По данным за 1979...81 год на Y_1 влияет и удельная теплота сгорания (X_1 и X_6) и расход сланца (X_8).

Удельный расход условного топлива Y₂ зависит от факторов X₁₂,Y₆ и Y₁₀ - т.е. от температуры колодного воздуха, поступающего в котлы, отпуска тепла и себестоимости тепла.

По данным 1979...81 года на Y₂ влияет и удельная теплота сгорания сланца X₂ и ее коэффициент вариации X₃.









Себестоимость электрознергии Y₉ зависит от удельной теплоты сгорания X₂ и влажности сланца X₅.

Результаты регрессионного анализа показателей Эстонской ГРЭС за I982 год (табл. 4)показывают, что к.п.д. котла Y_1 зависит от влажности сланца X_4 и температуры холодного воздуха X_{12} . Повышение температуры холодного воздуха, поступающего в котлы на IO К,повышает к.п.д. котла на 0,6 % (по данным за I979...8I год 0,37-0,45 %).

Таблица З

Результаты регрессионного анализа месячных показателей Прибалтийской ГРЭС 1982 г.

Фактор	Коэффициент регрессии	Свободный член регрессии	н Коэффициент корреляции
	По критерию	YI TK	
Xg VG	6,988·10 ⁻²	81,29	0,609
X 10 G CK	I,057·I0 ⁻²	81,75	0,614
	По критерию	Y2 Quy	
X 12 Tx6	0,3727	325,6	0,624
Y6 QT	-6,974·10 ⁻²	423,I	-0,701
Y ₁₀ C _T	7,857	386,I	0,778
	По критерию	Y _g C _a	
X2 cQS	0,7714	-7,774	0,639
X5 WP	-0,4615	5,944	-0,659

По данным за 1980...82 г. снижение коэффициента вариации суточных показателей удельной теплоты сгорания сланца за месяц X_3 на I % повышает к.п.д. котлов электростанции на 0,5 % (при V_{Q} I,5...4 %). Удельный расход условного топлива Y_2 зависит от удельной теплоты сгорания X_1 и X_6 . Повышение средней удельной теплоты сгорания сланца Q_6^c и Q_{H}^p на 0,1 МДж/кг приводит к снижению удельного расхода условного топлива на 0,4...0,5 г/кВт-ч.

По данным за период 1976...82 г. повышение средней удельной теплоты сгорания сланца Q^P_н на 0,1 МДж/кг приводит к повышению к.п.д. котлов: на Прибалтийской ГРЭС – 0,15...0,32 %, на Эстонской ГРЭС – 0,07...0,22 %.

Таблица 4

Результаты регрессионного анализа месячных показателей Эстонской ГРЭС 1982 г.

Par t	qo	Коэффициент регрессии	Свободный член регрессии	Коэффициент корреляции
-нах-ва	n sing n naToin	По критери	10 Y, 7K	in analyzaeroou Rixingé Router
X4	9WP	-0,632	88,6	-0,609
X 12	TxB	0,059	65,3	0,851
- 5.84	1	По критери	RO Y2 q, yT	
X1	ale	-4.30	455.0	-0,638
Xe	QP	-5,02	451,5	-0,761
X7	QP	-5,25	453,6	-0,777
		По критери	NO Yg Cg	
Xa	Ge	-3.10-4	I,18	-0,630
XII	G.	-1.10-5	I,18	-0,609
Y3	E	-4.10-4	I,19	-0,622
Y7	tN	-6.10-4	I,19	-0,621
Ya	7 N	-4.10-3	I,17	-0,595

Статистический анализ суточных данных электростанции и ПО "Эстонсланеп" выполнен за период 01.01.1979 по 31.12. 1982 года.

Для исследования были приняты четыре показателя фактора: удельная теплота сгорания сланца Q_{δ}^{c} и Q_{μ}^{p} , влажность сланца W^{p} и количество сланца G_{c} .

Целью исследований было составление годовых временных рядов по всем показателям и анализ их методами теории случайных функций путем вычисления на ЭВМ-НАИРИ З/I статистических оценок, коррелограмм и спектрограмм [4].

Нормированная корреляционная функция для составления коррелограмм определялась по формуле

$$\rho_{x}(t_{1},t_{2}) = \frac{k_{x}(t_{1},t_{2})}{\sigma_{x}(t_{1})\sigma_{x}(t_{2})},$$

а значения корреляционных функций $k_x(t_1,t_2)=k_x(t)$ и стандартные отклонения $\sigma_x(t)$ определялись по временным рядам суточных показателей за год. Максимальное значение периода $\tau = t_2 - t_1 = 60$ дней принято из условий, что за два месяца производится затухание корреляционной функции или она приобретает случайный характер.

Расчетная формула оценки спектральной плотности для составления спектрограмм включает дисперсию аргумента случайной функции, значения автоковариации и окно Тьюки-Хеннинга

$$\bar{S}_{\chi}(\omega) = D(\chi) + \sum_{k=1}^{n} k_{\chi}(\tau) \cos \omega \tau \left(1 + \frac{\pi \tau}{n}\right).$$

Расчеты выполнены при ширине окна n = 12, 24 и 48, т = = 0, 1, 2, ... 60.

На основе материалов (временных рядов), представленных Прибалтийской и Эстонской ГРЭС, были получены статистические оценки суточных показателей качества потребленного сланца по топливоподачам и электростанциям.

Статистическая оценка показателей количества и качества сланца, поступающего из разрезов на Эстонскую ГРЭС за 1981 и 1982 г. (табл. 5) показывает, что ряд варьируемости по коэффициенту вариации следующий: поступление сланца ($V_{\rm G}$ = 10,5...29,9 %), влажность сланца ($V_{\rm W}$ = 4,2..9,3 %) и удельная теплота сгорания ($V_{\rm Q}$ = 2,3...5,2 %).





Таблица

5

Статистическая оценка показателей количества и качества сланца, поступающего

из разрезов на Эстонскую ГРЭС

	Год	Удельн сланца	ar renn Q6, MI	OTA Crops	ания	Влеи	KHOCTD	сланца	WP %	Коли	uectbo	CJIBHIJB	G-10 ³ T
Pac Nega		×	>	A	E	×	7	A	ш	×	>	A	ш
Поступ- ление	1961	10°11	2,3	0,217	0,072	6'0I	4 ° S	0,086	0,230	29,I	16,0	-0,49	0,897
Ma paa-	1982	11,06	2.7	0,036	0,I4I	6°01	4,5	660*0	175,0	30,6	17,4	0,687	3,423
в т.ч. Сирга- ла	1981 1982	II,II II,II	4,4 4,8	0,107 0,143	0,372 0,109	10,9 10,9	5,0	0,240 0,356	0,190 0,414	I4,3 I5,0	20,3 17,8	0,610	I ,990 2 ,875
Вийви-	1961	II,I3	2,0	460*0	0,615	10,9	7,0	0,310	0,184	8,5	25 ,I	0,642	4,022
KUNNA	1982	II,I2	2,5	0,274	0,426	I0,8	6,2	-0,037	I,055	8,5	25,6	0,642	4,022
Нарв- ский	1981	I0,89 I0,89	5,0 4,5	0,228 0,218	0,072	I0,8 I0,9	8,9	0,16 0,188	-0,13 0,295	6,3 7,1	27,3	0,075	2,48I 3,443
ا ۲ ۱	средн	нее знач	ение; эксцесс	V - Козо	ффициент	вариа	:иип	A - K030	фициент	acMMM	етрии;		



Фиг. 6. Спектрограмма колебаний удельной теплоты сгорания сланца Q6 разреза Сиргала ПО Эстонсланец за 1982 г.





Суточные показатели электростанции и разрезов стабильные по годам. Законы распределения удельной теплоты сгорания сланца и влажности по выборочным значениям асимметрии и эксцесса (таблица 5) согласуются с нормальным распределением.

Анализ показывает, что коррелограммы стабильные по годам и наиболее сильное влияние на следующий день (T = I) имел раскод сланца по топливоподачам Эстонской ГРЭС (фиг. 5) $p_x(\tau) = 0.58...0.79.$

Влияние удельной теплоты сторания сланца и влажности на следующий день оценивалось значениями корреляционной функции $\varphi_x(\tau)$ по Q_5^c (0,43...0,62), Q_H^P (0,50...0,68), W^P (0,42...0,62).

Анализ спектрограмм колебаний удельной теплоты сгорания сланца Q_5^c по разрезам и в общем потоке (фиг. 6, 7) позволяет сделать вывод о наличии следующих периодических колебаний, связанных с календарным масштабом времени. По доли на общие колебания стоуктура влияния циклов следующая:

едельные пиклы	1530 %
секадные циклы	014 %
есячные циклы	IO24 %





Причинами наблюдаемых циклов являются прерывистость и неритмичность добычи на разрезах (пятидневная рабочая неделя) и недостаточный уровень организации и планирования работ по стабилизации качества и грузопотоков сланца с восточных разрезов. Наличие недельных и месячных циклов наблюдается и по спектрограммам колебаний суточного расхода сланца (фиг. 8).

Основные выводы и рекомендации

I. Исследование неравномерности расхода и качества сланца по месячным и суточным данным электростанций показывает следующий ряд варьируемости по коэффициенту вариации показателей: расход сланца ($V_{\rm G} = 8...18$ %), влажности ($V_{\rm W} = 1...9$ %) и удельная теплота сгорания сланца ($V_{\rm Q} = 0,5...3$ %).

2. Повышение среднемесячной удельной теплоты сгорания сланца на IOO кДж/кг приводит к повышению к.п.д. котлов на 0,I...0,3 % и к снижению удельного расхода условного топлива на 0,4...0,5 г/кВт.ч (в пределах ± 300 кДж/кг от среднемесячного значения II200 кДж/кг.).

3. Повышение расхода сланца со склада Прибалтийской ГРЭС на 10 тыс. т в месяц повышает к.п.д. котлов на 0,1 % (при изменении расхода сланца 17...102 тыс. т в месяц).

4. Повышение среднемесячной температуры холодного воздуха, поступающего в котлы на IC К, повышает к.п.д. котлов на 0,6 % и снижает удельный расход условного топлива на 0,5 г/кВт.ч (при изменении температуры холодного воздуха 263...290 К).

5. По коррелограммам и спектрограммам наиболее инерционным являются суточные показатели расхода сланца. Наличие недельных и месячных циклов показателей расхода и качества сланца необходимо учитывать при разработке мероприятий по управлению грузопотоками и качеством сланца.

Литература

I. Ыйспуу Л.М., Раюр К.Э., Ситс Х.И. Теплота сгорания энергетического сланца по отдельным поставщикам за 1968-1981 гг. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1983, № 546, с. 46-49. 2. Ыйспуу Л.М., Рейнсалу Э.Я., Роотамм Р.Э. О динамике качества сланца по электростанциям за 1960-1981 годы и до 2005 года. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1983, № 547, с. 3-13.

З. Арукюла Х.Х., Ыйспуу Л.М. Нестабильность и повышение однородности качества сланца, поступающего на электростанции. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1984. № 567, с. 39-53.

4. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика. М., Высшая школа, 1977. 479 с.

H. Arukula, L. Ôispuu

Statistische Analyse monatlicher und täglicher Kennziffer des Brennschiefers in Wärmekraftwerken

Zusammenfassung

In diesem Artikel werden die Resultate statistischer Bearbeitung der aus den regelmässigen Betriebsberichten des Baltischen und des Estnischen Wärmekraftwerks stammenden Ausbeutungsangaben für die Jahre 1976 - 1983 dargelegt. Es wurden dabei statistische Schätzungen der linearen Regressionsanalyse für monatliche Kennziffer und Korrelationsund Spektralfolgen für tägliche Kennziffer angewandt, um den relativen Einfluss verschiedener Faktoren auf die Leistungsfähigkeit des Wärmekraftwerks festzustellen.



TAILINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

600

ТРУЛЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИГУТА

УДК 622.732:662.67

Т.К. Пиху, А.А. Отс, К.Э. Раюр

ВЛИННИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНО-ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ МЕЛЬНИЦЫ НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ МЕЛЬНИЧНОГО ПРОЛУКТА

Все методы скигания твердых топлив в нивидем слое предъявляют повышенные требования к его гранулометрическому составу – лимитируется содержание крупных (более 5 мм) и мелких (менее 0,125 мм) частиц в топливе [I]. Существующие системы и установки подготовки топлива, применяемые при пылевидном сжигании, таким требованиям не удовлетворяют, так как производят много тонких фрекций, не пригодных для схигания в кипящем слое. Это требует создания специальных мельниц и мельничных систем, вырабатывающих грубый, но достаточно однородный продукт.

Центробежно-отражательное измельчение нажболее точно соответствует требованиям подготовки топлива к сжиганию в кипящем слое. Этот способ измельчения характеризуется высокой организованностью процесса: каждая частица получает один основной удар при определенной энергии. Кроме того можно применять низкие удельные энергии нагружения, что уменьшает переизмельчение топлива. Это является важным моментом при подготовке сланцев к сжиганию в кипящем слое, поскольку сланец склонен именно к переизмельчению.

Надо отметить, что мельницы такого типа успешно используются для самых различных целей, в том числе для измельчения абразивных материалов. Производительность таких мельниц доходит до 400 т/ч [2, 3].

Именщиеся исследования по ударно-отражательному измельчению [4, 5, 6] не позволяют сделать конкретных выводов для определения основных параметров центробежно-отражательной мельницы при подготовке сланцев к сжиганию в килящем слое.

Целью данной работы было выяснение влияния конструкционных параметров центробежно-отражательной мельницы на гранулометрический состав мельничного продукта.



Фиг. 1. Схема опытной установки:

корпус, 2 - рама, 3 - ротор, 4 - подщипниковый узел,
 клиноременная передача, 6 - электролвигатель, 7 - пробосборник, 8 - отражательные пластины, 9 - шнековый питатель, 10 - бункер, 11 - редуктор, 12 - электродвигатель питателя.
 G₁ - исходный продукт, G₂ - измельченный продукт.

Исследования проводились на лабораторной центробежноотражательной мельнице ЦОД-250, схема которой изображена на фиг. I. Опытная установка состоит из корпуса I, рамы 2, ротора 3, подшипникового узла 4, привода 5 и электродвигателя постоянного тока 6. Измельчаемый материал подается шнековым питателем 9 в центральную часть ротора, где ускоряющие лопатки сообщают частицам кинетическую энергию.За счет центробежной силы частицы выбрасываются на отражательные пластины 8 и разрушаются. Измельченный материал накапливается в пробосборнике 7 и в корпусе мельницы. Схема рабочей камеры мельницы и треугольник скоростей частиц показаны на фиг. 2.



Фиг. 2. Треугольник скоростей частицы на выходе из ротора: 1 - диск ротора, 2 - ускоряющая лопатка, 3 - отражательная пластина. β - угол вылета частицы; α - угол атаки α₁ = = 30°; α₂ = 60°; α₃ = 90°; V_T - тангенциальная составляющая скорости; V_R - радиальная составляющая скорости; V -- суммарная скорость вылета; n - скорость врашения ротора.

Конструкция экспериментальной установки позволяет изменять скорость вращения ротора п, угол атаки о ускоренной частицы и расстояние от центра ротора до отражательных пластин R. Основные данные об установке приведены в табл. I.

Тонина помола материала в центробежно-отражательной мельнице зависит, главным образом, от следующих трех параметров: удельной энергии соударения, угла атаки и радиуса установки отражательных пластин.

В исследованиях были применены эстонские горючие сланцы. Опыты проводились на трех монофракциях: 15-20; 7-10 и 3-5 мм. Такой выбор исходных фракций был обусловлен тем, что целью данной работы было исследование процесса грубого измельчения. Влияние удельной энергии соударения на гранулометрический состав тонких фракций сланцев исследовано заранее [4].

Таблица І

Технические данные лабораторной мельницы ЦОД-250

Технические данные	Величина
Диаметр ротора, мм	250
Количество ускорнощих лопаток, шт.	4
Количество отражательных пластин, шт.	16
Диапазон установки углов атаки, 0	15 - 105
Установочные радиусы отражательных пла-	
CTHH, MM	190, 180, 170
Максимальный размер частиц исходной	
франции, мм	20
Диапазон регулирования:	
скорости удара, м/с	30 - 120
удельной энергии, кДк/кг	0,45 - 7,2
Мошность поизона, кВт	3,2

Исследования проводились с высущенным при 90 °С топливом. Перед опытом дополнительно просеивали все франции для удаления налишей пыли и для разрушения агломератов. Для каждого опыта брали I иг материала. После размола продукт подвергался ситовому анализу. Отверстия сит были выбраны по ряду R 5 с модулем $\sqrt{10}$ (ГОСТ 6636-69). Потери материала при опытах были в пределах I-2 % и при ситовых анализах 2-4 %. Все опыты дублировались. Наиболее важным показателем, который характеризует центробежно-отражательное измельчение, нвляется абсолютная скорость вылета частицы из ротора (см. фит. 2):

$$V = \frac{\pi n}{30 \sin \beta} M/c , \qquad (I)$$

где r - радиус ротора, м;

п - скорость вращения ротора, об/мин;

В - угол вылета частицы.

По данным [7] опыты, проведенные на центробелных ускорителях, показали, что угол вылета варьируется в пределах β=55 ±5°.

Кроме скорости вылета применяются и понятия удельной энергии соударения:

$$\Theta_{y_R} = \frac{E}{M} = 10^{-3} \frac{V^2}{2} \text{ kAW/kr},$$

(2)

где Е - энергия частицы с массой М, кг; V - скорость частицы, м/с.

Для определения влияния удельной энергии соударения на гранулометрический состав мельничного продукта были проведены опыты при пяти скоростях и постоянном угле атаки, равном 90°.



Фиг. 3. Вероятность разрушения в зависимости от удельной энергчи.

На фиг. З выражена зависимость вероятности разрушения от удельной энергии на логарифмически нормальной сетке. Результаты хорошо складываются напрямую. Полученные результаты позволяют определить критическую удельную энергию Э уд.кр; соответствующую 50 % вероятности разрушения [8]. Установлены следующие критические удельные энергии для исследованных исходных фракций:

15-20 мм - 0,24 кДж/кг; 7-10 мм - 0,38 кДж/кг; 3-5 мм - 0,54 кДж/кг; оказывается, что с уменьшением размера фракции вероятность



Фиг. 4. Функция разрушения для эстонского горючего сланца исходной фракции 15-20 мм в зависимости: а) от энергии соударения, б) от угла атаки.

разрушения также снижается. Это объясняется главным образом масштабным эффектом и неоднородным составом сланца. Под масштабным эффектом надо понимать следующее: при уменьшении начального размера частицы вероятность разрушения уменьшается из-за уменьшения количества дефектов.

Распределение осколков при измельчении характеризуется функцией разрушения, показывающей относительную долю начальной фракции с нижней границей Х мкм, которая становится меньше, чем мкм. Функция разрушения вычисляется по формуле:

$$B(Y,X) = \frac{100 - R(Y)}{100 - R(X)},$$
(3)

где В - значение функции разрушения;

R - соответствующий ситовой остаток, %

На фиг. 4 приведена функция разрушения для фракции 15-20 мм при разных значениях энергии. Следует заметить, что при больших значениях энергии кривые функции разрушения выпуклые, что указывает на преобладание тонких осколков. При низких энергиях удара кривые вогнутые, указывающие на преобладание более крупного продукта помола. Можно сказать, что для остальных фракций действует аналогичная зависимость. Отсюда следует, что целесообразно применять низкие удельные энергии удара, которые обеспечивают минимальный выход тонкого продукта.

При малых значениях энергии весь материал не измельчается до требуемой тонкости и грубый остаток требует вторичного нагружения. Необходимый гранулометрический состав продукта окончательно формируется в сепараторе, откуда грубые фракции возвращаются в мельницу для доизмельчения.

В центробежно-отражательной мельнице наиболее интенсивно изнашиваются ускоряющие лопатки ротора. Интенсивность изнашивания, как известно, зависит от скорости и выражается степенной зависимостью [9]:

$$K = a V^m$$
, (4)

где К - интенсивность изнашивания;

- V скорость движения абразивной частицы;
- d, m коэффициенты, зависящие от свойств изнашиваемого материала и абразива.

Численная величина коэффициента m для сланца колеблется в пределах от 2 до 2,5 и в какой-то мере зависит от скорости. Из этого следует, что с уменьшением скорости частицы уменьшается износ ускоряющих лопаток.



Фиг. 5. Вероятность разрушения в зависимости от угла атаки.

Для определения влияния угла атаки на гранулометрический состав мельничного продукта были проведены исследования при следующих углах атаки: $\alpha = 30, 60, 90^{\circ}$. На фиг. 5 приведена зависимость вероятности разрушения от угла атаки. Оказывается, что с уменьшением угла атаки вероятность разрушения снижается. Угол атаки менее 30° применять нецелесообразно, поскольку при таких значениях усложняется конструкция отражателей в мельнице и возрастает интенсивность изнашивания отражательных пластин.

На фиг. 4 б приведена функция разрушения в зависимости от угла атаки при двух значениях энергии удара: 3,2 и 0,8 кДж/кг. Видно, что при значении угла атаки 90° выход тонкого продукта больше и влияние угла атаки на распределение осколков сильнее выражается при больших значениях энергии удара. Для остальных исследуемых фракций влияние угла атаки аналогично. Для определения влияния расстояния до отражательных пластин от ротора на разрушение частли топлива использовались данные опытов, проведенных при угле атаки $\alpha = 60^{\circ}$, на нескольких центробежно-отражательных мельницах, отличающихся по геометрическим размерам ротора и отражающего блока. Несмотря на различия в размерах ротора и отражающего блока. На разных мельницах влияния этих параметров на гранулометрический состав мельничного продукта не наблюдается. Можно сказать, что размеры мельницы не влияют на результаты грубого измельчения при центробежно-отражательном измельчении.

Выводы

I. Основным параметром, характеризукщим работу центробежно-отражательной мельницы, является энергия (скорость) удара. При подготовке эстонских горючих сланцев для сжигания в кипящем слое можно считать оптимальной энергию 0,45-0.8 кДж/кг, что соответствует скорости удара 30-40 м/с.

2. Вторым по важности параметром, влияющим на состав мельничного продукта, является угол атаки. Оптимальным можно считать угол в пределах 60-90°. Выбор значения угла зависит от конкретных целей. Угол 60° позволяет оформлять блок отражателей в виде замкнутого многогранника или отражательного кольца. Угол 90° дает более тонкий продукт помола.

3. Расстояние от ротора до отражателей и абсолютные размеры мельницы практически не влияют на состав мельничного продукта в области грубых франций (3-20 мм).

Литература

I. Раюр К.Э., Ыйспуу Л.М. О подготовке сланцев для сжигания в кипидем слое. Тезисы докладов Ш Всесоюзной конференции. Влияние минеральной части энергетического топлива на условия работы парогенераторов. Секция I. T. Б. Таллин, 1980. с. 83-88.

2. Хуземанн К. Конструкция и тенденции развитик ударно-отражательных мельниц тонкого измельчения. -Горный журнал. Известия высших учебных заведений. 1980, № 9, с. 94-99.

3. New centrifugal impact crusher offers many advantages. - Mining Journal, 1980, N 8, p. 111. 4. Раюр К.Э., Ыйспуу Л.М. Разрушение сланцевых частиц при свободном ударе. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1980, № 483, с. 17-29.

5. Китсник А.А. Исследование процесса и разработка технологии глубокого обогащения горючего сланца-кукерсита. Автореферат дис. канд. техн. наук. Таллин, 1978.

6. Раюр К.Э., Пиху Т.К., Ыйспуу Л.М. Кинетика размола топлива при ударно-отражательном измельчении. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1983, № 547, с.15-25.

7. К л е й с И.Р. Центробежный ускоритель ЦУК-ЗМ для определения относительной износостойкости материалов при абразивной эрозии. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1970, № 294, с. 23-33.

8. Смирнов Н.М. Определение вероятности разрушения зернистого материала при многократном высокоскоростном ударном нагружении. - Химия и химическая технология. Известия высших учебных заведений. 1977, № 4, с. 601-603.

9. Арумя э Х.В., Ыйспуу Л.М. О некоторых закономерностях изнашивания материалов бил молотковых мельниц. - Тр. Таллинского политехн. ин-та, 1978, № 455, с. 43-49.

10. T s c h o r b a d j i s k i I. Beanspruchungsmechanismus der Prallzerkleinerung beim schiefen Stoß und Einwirkung des Aufprallwinkels auf die Einzelkorn-Prallzerkleinerung von rheinischer Braunkohle. – Aufbereitungs-Technik, 1969, N 6, S. 277-283.

T. Pihu, A. Ots, K. Rajur

The Influence of the Centrifugal-Impact Mill Constructive Parameters on the Mill Product Granulometric Composition

Summary

The present paper discusses the influence of some constructive parameters on the mill product granulometric composition. The parameters are: different impact energy, angle of attack and distance of impact board. The data have been determined in the region of particle size of Estonian oil shale from 3 to 20 mm.



₩ 600

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

TPYIN TALINHCKOFO HOINTEXHMECHOFO MICTNEYTA

УДК 662.613.5 D.M. Лоосаар, Д.М. Егоров

ОБРАЗОВАНИЕ ОКИСЛОВ АЗОТА ПРИ ПЫЛЕВИДНОМ СЖИГАНИИ ЭСТОНСКОГО ГОРРИЕГО СЛАНИА НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ

В ходе прожименных опытов на пылесланцевых парогенераторах Прибалтийской и Эстонской ГРЭС, проведенных в 1979-1981 гг. лабораторией промтенлознергетики ТПИ, отмечены значительные колебания концентрации окислов азота в дымовых газах, коррелирующиеся с содержанием азота в топливе [1].

В связи с этим было предпринято исследование с целью получения достоверных данных относительно содержания азота в сланце, поступающем на электростанцию и установления его связи с образованием онислов азота. В период времени с января по имнь 1984 г. периодически отбирались пробы топлива с Эстонской ГРЭС, более карактерные из которых приведены в таблице.

Содержание азота в пробах топлиза определялось по методу Къеддаля. Результаты анализов вынемли колебание содержания азота в горячей массе топлиза от 0,21 до 0,41 % по массе. При этом раскодимость повторных опытов не превышала 20 %.

Полученные значения содержания азота в сланцах близки к приведенным ранее в литературе, например, у Торпана N^r = = 0,30-0,44 %, в нормативных методах N^P = 0,1 % [2, 3].

Опыты по сжиганию отобранных проб горочего сланца проводились на лабораторном стенде [4]. Сжигание проводилось в вертикальной камере сгорания с внутренним диаметром 56 мм при максимальной температуре 1450 К, расходах топлива 0,1-0,15 кг/час и временем пребывания пыли в камере сгорания в среднем I с.

Пробы дымовых газов на содержание онислов азота и других газовых компонентов отбирались в конце камеры сгорания. блица

Tac

	4	Характе	DUCTNYECKAR	величина				
№ пробы.	A ^c	Q5	cos	Sobun	S 0+K	S°c	Nc	LN
ЧИСЛО	8	KUW/KL	29	<i>b</i> g	%	Å	%	<i>BQ</i>
90-84 17.01.84	51,18	10039	22,74	I,43	I ,33	0,46	60°0	0,34
85-84 3.02.84	48,74	01911	20,58	I,73	I,63	0,52	0*0	0,23
88-84 16.02.84	50,09	11560	20,22	I ,66	I ,54	0,55	0,06	0,21
89-84 1.03.84	50 , I8	11162	22,28	I,78	I7.1	0,68	0,06	0,21
214-84 18.06.84	50,10	10014	22,72	I,46	I,37	0,54	0°09	0,32
215-84 20.06.84	50,6I	I0747	21 + I4	I ,56	I,48	0,52	01.0	0,36
213-84 3.07.84	50,02	11577	21,05	I ,68	I ,57	0,62	0,10	0,34
212-84 10.07.84	50,20	I0492	21,94	I,65	I,55	0,60	0,12	0,4I
Газовый анализ проводился при помощи газового хроматографа ЛХМ-8Д, содержание NO и NO_x определялось кулонометрическим прибором КДС-61.



Фит. 1. Концентрация азота, связанного в окислы в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Данные относительно выделения азота, связанного в окислы при различных избытках воздуха, приведенные к «= I, представлены на фиг. I. Коэффициент избытка воздуха « определялся в конце камеры сгорания, где практический процесс сгорания топлива завершился и концентрация окислов азота стабилизировалась на постоянном уровне.

Для кривых, приведенных на фиг. I, характерны резкий подъем до значений α≈I,2, более медленное увеличение содержания окислов азота до α≈I,8, в дальней-

35

шем выход окислов азота очень слабо зависит от избыточного воздуха.



фиг. 2. Концентрация азота, связанного в окислы в зависимости от содержания азота в горючей массе топлива. На фиг. 2 представлена зависимость выхода онислов азота от содержания азота в горючей массе топлива, составленная по фиг. I для больших ∞ (α≈1,8), которая описывается формулой

$$N_{NO_{X}}^{\alpha = 1} = 14 + 156 N^{\Gamma}, M\Gamma/M^{3}$$
 (I)

где N^Г - содержание азота в горючей массе топлива, в %.

Полученная линейная зависимость N^{г ж}выявляет долю топливных окислов азота в общем выбросе окислов ти азота. при данных условиях горения сланца.

Учитывая среднее содержание азота в эстонских горючих сланцах N^r= 0,3 %, получаем, что из топливного азота образуется 77 % от общего количества окислов азота. При этом доля топливного азота, перешедшего в окислы, составляет I3 % (при $\alpha = I_{2}$).

Для определения закономерности изменения концентрации топливных окислов азота с изменением избытка воздуха проведен условный перевод всех измеренных содержаний окислов азота на одинаковое содержание азота в топлиее (N^г = 0,4I) по формуле (I). При этом снята доля атмосферных окислов азота, учитывая их слабую зависимость от избыточного кислорода ($\sim \sqrt{0}_2$).

Полученный результат изображен на фиг. 3 и описывается следующим уравнением:

$$N_{N0x}^{\alpha=4} = 24,4N^{\Gamma} + 200,5N^{\Gamma}(\frac{\alpha-1}{\alpha})^{0,4}, \text{ Mr/M}^{3}$$
(2)

Уравнение (2) удовлетворительно характеризует изменение концентрации окислов азота при сжигании пивевидного горючего сланца в зависимости от коэффициента избытка воздуха для области с = 1,0-2,0.



Фиг. 3. Кондентрация азота, связанного в топливные окислы, приведенная к N^Г = 0.41 %, в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Учитывая литературные данные относительно зависимости образования топливных окислов азота от температуры [5]

N_{NOx} ~ (T_м -1025)^{0,33} нолучаем, что выход топливных окислов азота в промышленных котлоаграгатах за счет более высокой температуры должен быть в I_s2 раза больше, чем при данных опытах. В этом же источнике [5] даются сведения об уровне атмосферных окислов азота при температуре 1800 К - примерно 20 мг/м³.

Из вышесказанного следует, что в промышленных котлоагрегатах, сжигающих эстонские горючие сленца, следовало бы ожидать концентрации окислов азота $N_{NO_X}^{\alpha=1} = 85 \text{ мг/m}^3$ (для $\alpha = 1,25$, T = 1750 K, $N^{\Gamma} = 0,41 \%$), переведенное на NO₂ это будет 280 мг/м³.

Полученная оценка удовлетворительно совпадает с данными исследований на промыжленных котлоагрегатах [1].

В итоге следует отметить, что содержение азота в эстонских горнчих сленцах, поступанацих на Эстонскую ГРЭС, колеблется примерно в два разе (N^r= 0,2I - 0,4I %), при этом среднее содержение совпадает с ранее приведенными в литературе данными. Двухиратное изменение содержения топливного азота приводит к соответственному изменению концентрации окислов азота, в дымовых газах примерно в I,7 раза. Линейная зависимость не соблюдается в связи с относительно большой долей атмосферных окислов азота (в среднем 20%).

Литература

I. От с А.А., Егоров Д.М., Лоосаар Ю.М. О выделении токсичных и канцерогенных веществ при сжигании эстонского горючего сланца в энергетических котлоагрегатах. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1982, № 522.

2. Торпан Б.К. и др. Технико-химическая характеристика кукерситного сланца западного крыла Эстонского сланцевого бассейна. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1954, № 57.

 З. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. М., Энергия, 1973.

4. Е горсв Д.М., Лоосаар Ю.М. О выделении токсичных веществ при пылевидном сжигании диктионемового сланца и кукерсита на опытном стенде. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1984, № 579.

5. Титов С.П. Исследование процесса образования топливных окислов азота при горении угольной пыли. Автореферат. М., 1982. J. Loosaar, D. Yegorov

Nitrogen Oxides Formation in Burning Pulverized Estonian Oil Shale on the Experimental Stand

Summary

The information about nitrogen content in Estonian oil shale is given. Nitrogen oxides formation in burning oil shale in laboratory conditions is investigated.

Nitrogen oxides emission mainly depends on nitrogen content in oil shale and oxygen concentration in flue gases. On the basis of experimental data quantitative relation between nitrogen oxides emission, nitrogen content in fuel and oxygen concentration in flue gases is proposed.



№ 600

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 620.179.2 А.Х. Таукар, М.М. Кууск

СЦЕПЛЕНИЕ ГРАФИТОВЫХ ЧАСТИЦ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Наличие термофоретических сил является специфической особенностью неизотермических систем "газ-частица" и приводит к осредненному движению частиц в направлении, противоположном градиенту температур и образованию отложений. Силы термофореза также существуют в образовавшемся слое отложений.

Адгезия обусловлена различными по своей природе силами. Отдельные составляющие сил адгезии могут превалировать над другими. В отложениях, где в определенных условиях между частицами и частицей-стенкой не существуют химические связи, капиллярные и кулоновские силы, при наличии градиента температуры превалируют термофоретические силы. Особое значение термофорез имеет для мелких, субмикронных частиц. В данном случае интерес представляют силы, влияющие на графитовые частицы со средним диаметром 7...8 мкм.

Адгезия характеризуется силой, возникающей при контакте частиц с разными поверхностями. Силы адгезии равны по значению и обратны по знаку силам отрыва частиц с запыленной поверхностью.

Силы, способные отрывать частицы от поверхности, могут быть разного рода: гравитационного, инерционного, кулоновского, аэродинамического и т.д. С точки зрения простоты измерений и анализа данных пригодным в данном случае является применение сил инерционного рода, конкретно – вибрационного.

Вибрационный метод впервые был предложен для определения адгезии пленок. Для определения сил адгезии пыли вибрационный метод используется в газовой среде. Для этой цели применяются низкочастотные (до IO-ти Гц) и высокочастотные (сотни тысяч Гц) колебания. Варьируя частоту колебаний, мож но регулировать отрывающие силы в широком диапазоне.

Если известна частота колебаний и амплитуда, то на основании этих данных можно вычислить отрывную силу, действующую на частицу при вибрации запыленной поверхности, следующей формулой:

$$F_{otp} = m(j+g) \tag{I}$$

$$j = 4 \pi^2 \gamma_{\kappa}^2 A \cos(\omega t + \pi/2) \quad \mu \quad \omega = 2\pi \gamma_{\kappa}, \qquad (2)$$

где m - масса частиц пыли;

- ј ускорение колебательного движения;
- VK- HACTOTA;
- А амплитуда колебаний;
- t время.

Рассчитанная по этой формуле величина силы отрыва является максимальной, когда cos($\omega t + \pi/2$) = 1.

На основе предварительных расчетов основными параметрами стенда выбраны A= 3 мм и Ук = 5...50 Гц.

При плоскопараллельной вибрации охлаждаемой поверхности для получения различных значений F_{отр} потребовалось провести несколько опытов на разных v_{k} . Однако для лучшего сопоставления опытных данных (постоянство температурного режима) конструкцию стенда усовершенствовали, закрепив верхнюю часть узла "нагреватель-охладитель" на горизонтальной неподвижной оси, а вибропривод осуществлялся через нижнюю часть, что позволило в результате одного опыта получить разные значения $F_{oтр}$ на поверхности. Это привело к увеличению объема гранулометрических измерений, но позволило повысить точность измерений.

Основной проблемой в конструкции стенда было обеспечение одномерного стационарного температурного поля по всей площади как нагревателя, так и охладителя, тем самым обеспечивалось постоянство градиента температуры, поддерживаемого на уровне $1,5 \cdot 10^5$ К/м. В цели между нагревателем и охладителем ($\delta = 2$ мм) помещены термопары, с помощью которых контролировались температуры поверхностей. Температура охладителя поддерживалась выше 373 К. Поверхность охладителя запылялась графитовой пылью тонким равномерным, по визуальным оценкам, монослоем. Опыты проводились в воздушной среде.

После каждого опыта на определенном расстоянии (в зависимости от частоты колебания) от нижнего края пластины образовывалась резкая граница отпадания частиц от запыленной поверхности. В последующем был проведен гранулометрический анализ препаратов графитовых частиц, взятых непосредственно выше и ниже границы отрыва. По данным микроскопического анализа были построены зависимости относительных масс фракций (см. фиг. I).

На графике видно, что линии соответствующие препаратам, взятым выше и ниже линии отрыва, для мелких частиц практически совпадают. Расходятся графики, начиная с точки, соответствующей величине частиц порядка II мкм. Видимо, вблизи значения диаметра частиц II мкм находится предел влияния термофоретических сил при условиях проведения опыта.



Фиг. 1. Распределение массы отложений по размерам частиц.

Сосредоточивая внимание на отмеченный предел, рассчитаны силы термофореза для частиц от IO...I2 мкм. В виде графика результаты приведены на фиг. 2. Силы термофореза рас-



Фиг. 2. Сила отрыва и сила термофореза в зависимости от размера частии: ⊙ - сила отрыва; ▲ - сила термофореза, рассчитанная по [3]; ● - по [4]; △ - по [5]; □ - по [6]; × - по [2]; ▼ - по [6]; ■ - по [7].

считаны по формулам, приведенным в [2, 3, 4, 5, 6, 7] для крупных (K_n << 1) и умеренно крупных (K_n = 10⁻²...10⁻¹) частиц. Из графика видно пересечение линии силы отрыва частиц с линиями термофореза, построенных по рекомендациям Яламова и Ивченко [2]; Яламова и Дерягина [4, 5]; Яламова и Ошканова [6], рассчитанных для умеренно крупных частиц.

В результате проведенных опытов можно отметить, что вибрационный метод определения адгезионных сил в приведенных условиях оправдывается, полученные данные позволяют ориентироваться во множестве формул по расчету термофореза.

Литература

I. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. Химия, М., 1976, 437 с. 2. И в ченко И.Н., Яламов Ю.И. Прямой метод расчета термофоретической силы, действующей на умеренно крупную аэрозольную частицу. - Коллоидный журнал, 1972, т. 24. № 5. с. 769-772.

3. И в ченко И.Н., Яламов Ю.И. Гидродинамический метод расчета скорости термофореза умеренно крупных нелетучих аэрозольных частиц. - Журнал физической химии, 1971, т. 45, № 3, с. 577-582.

4. Я л а м о в Ю.И., Д е р я г и н Б.В. Теория термофореза умеренно крупных и крупных аэрозольных частиц с Учетом теплового скольжения и скачка температуры у поверхности частиц. – Коллоидный журнал, 1971, т. 33, № 2, с. 294-300.

5. Дерягин Б.В., Яламов Ю.И. Теория термофореза умеренно больших аэрозольных частиц. - Доклады АН СССР, 1964, т. 155, № 4, с. 886-889.

6. Яламов Ю.И., Ю пканов А.А., Барсегян О.А. К вопросу о зависимости от числа Кнудсена скорости термофореза умеренно крупных нелетучих частиц. -Журнал физической химии, М., 1974, № 1614-74, ДЕП., 19 с.

7. Brock J.R. On the theory of thermal forces acting on aerosol particles. - Journal of Colloid Science, 1962, vol. 17, N 8, p. 768-780.

A. Taukar, M. Kuusk

Graphite Particles Adhesion onto Metallic Surfaces under Nonisothermic Conditions

Summary

In the present paper the vibrational methods application results for the determination of adhesion forces are given. There is given also a comparison between the data of thermophoretical forces, calculated according to the formulas of different authors, and the experimental data.



滕 600

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.313.522

А.А. Отс. А.В. Прикк, Р.В. Тоуарт

КОРРОЗИЯ СТАЛЕЙ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ГАЗА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОТАША

Тепловосприятие поверхностей нагрева (ПН) котлов ТЭС в условиях омывания их забалластированными продуктами сгорания (ПС) определяется, главным образом, эффективностью их периодической очистки от натрубных отложений. В этом смысле в котле-утилизаторе МГДЭС условия работы ПН вследствие ввода в систему щелочной ионизирующейся присадки еще более обостряются.

Это значит, что котел МГД-энергоблока должен быть оборудован эффективно действующими системами периодической очистки ПН от золоприсадочных отложений разнотипными средствами (паровая обдувка, водяная обмывка, дробе-, акустическая и газоимпульсная очистка и др.).

В циклах периодической очистки ПН обычно совместно с отложениями полностью или частично отделяется защицающая металл от коррозии оксидная пленка. Такме периодические разрушения уменьшают диффузионное сопротивление последней, что неизбежно ускоряет высокотемпературную коррозию металка. Таким образом, коррозионно-эрозионный износ труб ПН определяется условиями высокотемпературной коррозии металка, ускоряжщим фактором которой является периодическое разрушение оксидной пленки в циклах очистки.

Из выпесказанного становится ясным, насколько важным является вопрос правильности выбора марки стали, а также систем, средств и, особенно, режимов очистки ПН при проектировании и эксплуатации котлов МГДЭС. Последнее требует разработки основ для прогнозирования износа ПН в условиях их периодической очистки от отложений.

Обычно глубину коррозионно-эрозионного износа в условиях периодической очистки ПН определяют по формуле [1]:

- $\Delta S = 1 + \xi (Bm^{1-n} 1)\Delta S',$ (I)
- где < степень разрушения оксидной пленки в циклах очистки;
- m = τ/τ₀ количество циклов очистки за время работы τ; τ₀ - период между циклами периодической очистки ПН;
 - п показатель степени окисления металла;
 - В коэффициент, учитывающий влияние первоначальной стадии коррозии на износ труб и
 - △S' глубина коррозии металла под влиянием натрубных отложений за время て.

На основе выражения (I) глубина износа труб в условиях периодической очистки их является пропорциональной глубине высокотемпературной коррозии ΔS', а ускоряющее действие очистки выражается комплексом $[1 + \xi(B^{1-n} - 1)]$. Степень разрушения оксидной пленки & учитываэт уменьшение диффузионного сопротивления оксидной пленки вследствие воздействия очистительной силы. При слабой очистительной силе или отсутствии ее § = 0 и $\Delta S = \Delta S'$. При полном удалении оксидной пленки в цикле очистки $\xi = I$, а при удалении C0вместно с оксидной пленкой и части основного металла $\xi > I$. Большое влияние на коррозионно-эрозионный износ труб имеет показатель степени окисления металла п , определяемый кинетическим уравнением высокотемпературной коррозии. Чем ниже п, тем более чувствителен металл к периодическим силовым действиям. Коэффициент В учитывает ускорение коррозии в первоначальной стадии после снятия или разрушения оксидной пленки.

Выражение (I) позволяет репить ряд практических задач, связанных с прогнозированием износа труб в условиях их периодической очистки от отложений.

В рамках настоящей работы на основе уравнения (I) производился расчет ожидаемого коррозионно-эрозионного износа для различных периодов работы труб (τ ,ч) при различных периодах между очистками (τ_0 ,ч) и степенях разрушения оксидной пленки (ξ). В расчетах учитывался коэффициент запаса I,3, а коэффициент В из-за отсутствия в настоящее время данных по коррозии сталей в первоначальной стадии под влиянием поташа принимался равным I,0. Расчеты производились для сталей Ст. 20, I2XIMФ, I2X2MФСР, IIXIIB2MФ (ЭИ-756) и I2XI8HI2T на основе кинетических уравнений [2] коррозии в продуктах сгорания газа под воздействием отложений поташа,

На фиг. I-2, в качестве примера, представляются номограммы для определения продолжительности работы труб из сталей I2XIMФ и I2XI8НI2Т в продуктах сгорания газа под воздействием поташа до заданной $\Delta S = I$ мм (глубина равномерной коррозии при $\psi = I,3$ составляет 0,77 мм) при периодах между очистками 4-I92 часов и степенях разрушения оксидной пленки 0,05-0,50.

Номограммы для определения допустимого периода между очистками при заданной $\Delta S = I$ мм, $\tau = 50~000$ и IOO 000 ч и $\xi = 0,05-0,70$ для ПН из тех же сталей представляются на фиг. 3-4.

На основе полученных результатов разработаны рекомендации по применимости перечисленных выше сталей, а также по выбору схем. средств и режимов очистки ПН котла Π-74 МГД-энергоблока 500 МВт Рязанской ГРЭС в условиях сжигания природного газа с добавкой, в качестве ионизирующейся присацки, поташа. Учитывая изложенные результаты, а также имеющийся большой опыт сжигания на ТЭС тверпых топлив со сложным составом минеральной части, пароперегреватель котла-утилизатора П-74 должен очищаться комбинированным способом - часто включаемой газоимпульсной, ударной ИЛИ виброочисткой и редко включаемой водяной обмывкой, а низкотемпературные поверхности водяного экономайзера следует очищать водяной обмывкой.

Особо важным является вопрос правильного выбора режимов очистки в ходе эксплуатации котла. Если выбор типов очистительных аппаратов, определение необходимого их количества и схемы расположения во многом определяются конструкцией котла, то выбор оптимальных параметров их работы требует проведения специальных исследований. При этом необходимо учитывать, что увеличение интенсивности очистки, с одной стороны, увеличивает тепловосприятие ПН, но, с другой стороны, возрастает скорость коррозионно-эрозионного износа труб.



Фиг. 1. Номограмма для определения продолжительности работы труб из стали 12Х1МФ в продуктах сгорания газа под воздействием поташа в зависимости от заданных & и то.



Фиг. 2. Номограмма для определения продолжительности работы труб из стали 12X18Н12Т в продуктах сгорания газа под воздействием поташа в зависимости от заданных § и то.»



Фиг. 3. Номограмма для определения допускаемой частоты периодической очистки труб из стали 12Х1МФ в продуктах сгорания газа под воздействием поташа.



Фит. 4. Номограмма для определения допускаемой частоты периодической очистки труб из стали 12X18H12T в продуктах сгорания газа под воздействием поташа.

Литература

1. Ots A.A., Tallermo H.J., Tomann E.L. Suurkuusk T.N. Corrosive erosive wear of steam generator heating surfaces. - Fouling and Corrosion in Steam Generators. Beograd, 1980, p. 107-126.

2. Отс А.А., Прикк А.В., Тоуарт Р.В. Расчет скорости коррозии котельных сталей под влиянием отложений потеша применительно к парогенераторам МГДЭС. -Доклад на научно-техническом совещании. "Физико-технические проблемы создания МГДЭС". Киев, 2-8 сент. 1984, Д4. I-Д4. 4.

A. Ots, A. Prikk, R. Touart

Steels Corrosion in the Gas Burning Products under the Influence of Potash

Summary

The method and the results of calculating prediction for the 12X1MØ and 12X18H12T steels corrosive-erosive wear in the gas burning products under the influence of potash in the conditions of heating surfaces periodic cleaning from potash deposits are presented, ₩ 600

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУЛЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.181.8

Т.Н. Сууркууск, Р.В. Тоуарт

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИН МЕТАЛЛА ЭКРАНОВ НРЧ ТОПКИ КОТЛА СКД ПРИ СЖИГАНИИ ЭКИБАСТУЭСКОГО УГЛЯ

Анализ отказов энергоблоков, работающих с котлами сверхиритического давления (СКД) разных типов, показывает, что одним из факторов, снижающих надежность работы блока, является пониженный ресурс экранов нижней радиационной части (НРЧ) топки котлов. К примеру, в цельносварных экранных панелях НРЧ котлов П-57 при работе на экибастузском угле за 20-30 часов после ввода их в эксплуатацию появились массовые повреждения труб в виде усталостных трещин. Это обстоятельство предопределяло необходимость детального исследования температурного режима и теплонапряженного состояния металла экранов НРЧ упомянутых котлов.

Для проведения исследований в фронтовой экран НРЧ топки котла П-57 к центру зоны сосредоточения повреждений устанавливали специальную опытную вставку, позволяющую фиксировать температуру наружной поверхности металла в разных точках: в центре обращенного в топку полупериметра трубы под углом 45° от лобовой образующей трубы; в центре двух соседних. сварных плавников и в центре необогреваемого, тыльного полупериметра трубы. Вставка, установленная возле оси топки на уровне 18,8 м (описание котла П-57 приведено в[1]), позволила также фиксировать локальный воспринятый тепловой поток. Для этого в одном сечении трубы на разной глубине от наружной поверхности (0,8 и 3,5 мм) были установлены две термопары.

Измерения температуры металла проводились сериями при разных нагрузках котла. Локазания термопар записывались многоканальным быстродействующим прибором типа H338-6. Выяс-

нилось, что в статическом режиме работы котла с неизменной нагрузкой температура наружной обогреваемой поверхности металла труб циклически меняется. При разных нагрузках кот-(от 60 до 100 %) эти колебания температуры имели одила наковый характер - с течением времени произошло плавное снижение температуры обогреваемой поверхности металла C последующим скачкообразным восстановлением ее до исходного значения. Температура металла необогреваемой половины периметра труб в то же время эсталась неизменной. Переход температуры металла труб на новый уровень в этих скачкообразных повышениях совершался в течение 15-20 с. причем первые 3-5 с скорость подъема земпературы была максимальной и достигала 5-6 °С/с.

Одновременно со скачкообрелным повышением температуры обогреваемой поверхности металла экранов произошло и скачкообразное повышение локального, воспринятого вставкой. теплового потока. В то же время одновременные измерения падающего на экран лучистого теплового потока (из рядомстоящего с измерительной вставкой лючка) при помощи рациометра постоянного действия, описанного в [2], показали, что во время скачкообразных повышений температуры металла и воспринятого вставкой теплового потока средний уровень падающего на экран лучистого теплового потока не менялся. Ha фиг. I представлены характерные зависимости температуры обогреваемой поверхности металла, воспринятого вставкой и падающего на него тепловых потоков от времени в момент очередного температурного скачка.

Скачкообразное повышение температуры металла обогреваемой поверхности труб при постоянном уровне падающего на него лучистого теплового потока и при постоянной температуре среды внутри труб может происходить по двум причинам: во-первых, при скачкообразном снижении теплового сопротивления (толщины слоя) золовых отложений на его наружной поверхности либо, во-вторых, при скачкообразном снижении интенсивности охлаждения металла труб из-за внезапного изменения расхода среды через исследуемую трубу. В первом слуцае скачкообразное повышение температуры металла сопровождается скачкообразным повышением воспринятого теплового потока, а во втором случае – скачкообразным снижением последнего. Следовательно, результатами прямых измерений од-

56

нозначно доказано, что резкие скачкообразные повышения температуры наружной обогреваемой поверхности металла экранов в данном случае происходят в результате периодической самоочистки поверхности экрана от золовых отложений. Аналогичные температурные скачки в металле разных точек экранов НРЧ котлов типа П-57 при их работе на экибастузском угле зафиксированы и исследованиями Уральского филиала ВТИ и НПО ЦКТИ.

Следует отметить, что самоочистка топочных экранов свойствена котлам, работающим на топливах с химически относительно неактивной нейтральной тугоплавкой золой. При пылевидном сжигании таких топлив на экранных поверхностях образуются сыпучие неспекающиеся отложения с незначительной механической прочностью. Экибастузский уголь, зола которого, в основном, состоит из SiO2 и Al2O2 при суммарном содержании окислов кальция и щелочных металлов менее 3.0 % (в бессульфатной массе) при этом является и многозольным топливом. В настоящее время в котлах П-57 сжигается уголь, содержащий в своей рабочей массе от 40 ПО 60 % золы. Можно предположить, что при сжигании топлива с такой высокой зольностью происходит интенсивное загрязнение топочных экранов - особенно в районе расположения горелок. где процессы массообмена наиболее интенсивны. По мере возрастания толщины слоя отложений золы возрастает и их масса. Этот процесс продолжается до того момента времени. когда сила тяжести отложений превышает силу их сцепления с трубами, либо силы, связывающие золу в отложения. В этот момент происходит самопроизвольная, соответственно полная или частичная самоочистка данной точки экрана.

Измерения температуры металла экранов НРЧ показали, что самоочистка экранов имеет узколокальный характер – в 50 % случаев скачки температуры не совпали у термопар,установленных в разные точки периметра одного сечения трубы на расстояниях 12-25 мм друг от друга. Также обращает на себя внимание тенденция увеличения температурных скачков с понижением нагрузки котла (от 100 до 60 %). Так, например, при номинальной нагрузке котла средняя величина температурных скачков была 30 °С (максимальная 55 °С), а при нагрузке 0,65 D_H – 40 °С (максимальная 85 °С).

Анализ частоты повторения температурных скачков в металле фронтового экрана НРЧ показал, что они повторяются случайно, периодом от 5 до 70 минут. Четкой зависимости периода между очередными температурными скачками от нагрузки котла не наблюдалось, хотя можно предположить, что период с повышением нагрузки из-за интенсификации массообмена должен сокращаться. В то же время в опытах при одинаковой нагрузке котла, выполненных в разные дни, средний период между скачками менялся до двух раз (при номинальной нагрузке - от 25 до 50 мин). По всей видимости это явление связано с изменением качества (зольности) топлива. Второй особенностью температурного режима металла НРЧ котла П-57 является наличие пульсаций температуры с малой амплитудой с периодом от IO до 60 с. При этом максимальную амплитуду эти пульсации имели непосредственно после очередного цикла самоочистки (\pm 5 ^oC), а после IO-20 мин. их амплитуда становилась минимальной или они вообще исчезали. Одновременные измерения падающего на экран лучистого теплового потока показали, что эти колебания температуры происходят синхронно с флуктуациями падающего на экран лучистого теплового потока (см. фиг. I). Следовательно, эти пульсации температуры металла вызваны пульсациями интенсивности излучения факела, а убывание их амплитуды вызвано возрастающим демферирующим: воздействием утолщающегося слоя отложений золы.

Опыт эксплуатации котлов СКД и специальные исследования [3] показывают, что со временем, из-за накопления внутритрубных железоокисных отложений, температура металла экранов НРЧ постепенно увеличивается. При традиционном гидразинно-аммиачном водном режиме темп накопления внутритрубных отложений во фронтовом экране НРЧ котла П-57 около 200 г/ m^2 за 10 тыс. часов. Такой слой внутритрубных отло-жений имеет термическое сопротивление 0,0009 (m^2 ·K)/Вт. На основе сказанного ясно, что экспериментальные данные о температурном режиме металла экранов НРЧ, полученные опытной вставкой непосредственно после его монтажа, не могут рассматриваться представительными для продолжительного периода эксплуатации котла без кимической очистки. На фиг. 2 представлена характерная, экспериментально установленная зависимость температуры металла фронтового экрана НРЧ котла П-57 при номинальной его нагрузке от времени, а также расчетные зависимости этой температуры после 10, 20 И 30 тыс. часов работы котла при вышеуказанном темпе накопления внутритрубных отложений. Как видно, темп прироста средней рабочей температуры наружной поверхности TOVÓ 25 °C за IO тыс. часов работы котла, а средние и максимальные температурные скачки, которые у чистых от внутренних отложений труб составляют соответственно 30 и 55 °С после IO, 20 и 30 тыс. часов работы котла без химической промывки, возрастают соответственно до 44, 59 и 73 и до 81, III и 134 °C.

Изменения воспринятого теплового потока в циклах самоочистки влекут за собой и скачкообразные изменения перепада температуры по толщине обогреваемого полупериметра стенок труб, что влечет за собой и скачкообразные изменения в напряженности металла. Амплитуду переменной составляющей напряжений можно рассчитать как разность напряжений в стенке трубы непосредственно до и после очередного цикла самоочистки. Рассчитав по [4] температурные напряжения и напряжения от внутреннего давления среды увидим, что температурные напряжения сжатия в наружной поверхности превышают напряжения растягивания от внутреннего давления и что при скачках температуры суммарные напряжения в наружных слоях стенки трубы, в основном, своего знака не меняют.

Фиг. 3. Напряжения в наружной поверхности металла труб экранов НРЧ котла П-57 в зависимости от времени.

На фиг. З представлена зависимость результирующих напряжений от времени, рассчитанных на основе температурной зависимости на (фиг. 2). Отсюда видно, что металл труб работает в условиях переменных, в основном, знакопостоянных напряжений. Циклическое повторение напряжений, имеющих при среднем температурном скачке амплитуду 78 МПа и 142 МПа при максимальном скачке, является причиной усталостных повреждений металла труб.

Следует отметить, что переменная составляющая напряжений, вызванная скачкообразным изменением воспринятого конкретными точками поверхности нагрева теплового потока, с накоплением внутритрубных отложений не увеличивается. Однако в результате вызванного указанным процессом повышения обцего температурного уровня металла труб металл становится более повреждаемым, так как с повышением рабочей температуры металла наблюдается резкое снижение показателей его усталостной прочности [5]. Из сказанного ясно, что для увеличения надежности работы экранов НРЧ котлов П-57 необходимо проводить регулярные эксплуатационные химические очистки их от внутритрубных отложений.

В заключение необходимо подчеркнуть, что переменный температурный режим и вызванное им переменное напряженное состояние металла труб экранов НРЧ котлов П-57, которое является причиной усталостных повреждений, связано со спецификой загрязнения топочных экранов при сжигании экибастузского угля. Процесс циклической точечной самоочистки экранов обусловлен свойствами золы экибастузского угля и, по-видимому, неустраним. В будущем, при выборе основных конструктивных решений новых котлов СКД для сжигания этого угля целесообразно проанализировать конструктивные и режимные возможности для снижения интенсивности массобомена в НРЧ топки – это приведет к снижению темпа загрязнения экранов и, следовательно, к снижению частоты самоочисток, в результате чего увеличивается время работы металла их труб.

Литература

I. Котельные и турбинные установки энергоблоков мощностью 500 и 800 МВт. Создание и освоение / Под ред. В.Е. Дорощука и В.Б. Рубина. М., Энергия, 1979. 680 с.

2. Сууркууск Т.Н., Вийльманн И.Р. Исследование характера излучения факела в НРЧ топки котла П-57. См. наст. сб., с. 65.

3. Глебов В.П., Эскин Н.Б., Трубачев В.М., Таратута В.А., Кяар Х.А. Внутритурбинные образования в паровых котлах сверхкритического давления. – М., Энергоатомиздат, 1983. 238 с.

4. ОСТ 108.031.02-75. Котлы стационарные паровые и водогрейные и трубопроводы пара и горячей воды. Нормы расчета на прочность. М., Металлургия, 1973. 408 с. 5. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. М., Энергия, 1980. 424 с.

T. Suurkuusk, R. Touart

Investigation of Tubes' Metal Stress Conditions in the Lower Radiation Part of Ekibastuz Coal Burning Supercritical Boiler Furnace

Summary

In this paper the data of experimental investigation on tubes' metal stress conditions in the lower radiation part of the supercritical pressure boiler furnace while burning the Ekibastuz coal are presented. The tubes metal is subjected to cyclic actions of temperature stresses caused by two processes - high frequency low amplitude metal temperature variation caused by the flame pulsation and low frequency high amplitude temperature variation caused by tubes' self-cleaning process. The present study shows that these cyclic temperature stresses limit the operating time of the tubes in the lower radiation part of the boiler furnace.

₩ 600

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED TPYJH TALINHCHOFO NOINTEXHNYECKOFO MHCTNTYTA

> УДК 62-79:621.783 Т.Н. Сууркууск, И.Р. Вийльманн

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗЛУЧЕНИЯ ФАКЕЛА В НРЧ ТОПКИ КОТЛА П-57

Котел П-57, предназначенный для сжиганыя экибастуэского угля, имеет паропроизводительность 458,3 кг/с при нараметрах пара 25,0 МПа и 545 °С. 25-30 тыс. часов после ввода их в эксплуатацию на экранах нижней радиационной части(НРЧ) топки, выполненной в виде цельносварных панелей из плавниковых труб, были обнаружены повреждения в виде поперечных рисок и трещин. Осмотр экранов НРЧ и исследования вырезок из разных зон экранов показали, что повреждения сосредоточены, в основном, в центральной части фронтового и заднего экранов, начиная с уровня расположения нижнего яруса горелок до стыка НРЧ и средней радиационной части (СРЧ).

Топочная камера котла П-57 имеет сечение 21,84x8,84 м, встречное (на боковых экранах) двухярусное расположение горелок на отметках 13,7 и 17,7 м. Стык между НРЧ и СРЧ находится на отметке 24,15 м. При номинальной нагрузке котла теплонапряженность топочного объема 1326 кВт/м² и сечения топки 5955 кВт/м². Проектное тепловосприятие экранов НРЧ составляет 227 кВт/м². Подробное описание котла П-57 приведено в [1].

Исследования структуры металла поврежденных труб, отсутствие у них заметного утонения стенок с огневой стороны и контрольные измерения температуры металла подтверждала, что в эксплуатации котла температура металла подтверждала, что в эксплуатации котла температура металла пруб в зоне сосредоточения повреждений не превышает допустимой для данной марки стали (ст. I2XIMP) – следовательно, повреждения имеют усталостный характер происхождения. Наличие усталостных повреждений труб экранов НРЧ указывает на нестационарность теплонапряженново состояния металла при эксплуатации котла. Последнее, в свою очередь, может быть обусловлено флуктуациями падающего на экраны теплового потока. Исходя из заданного было выполнено исследование интенсивности и характера излучения факела на экраны НРЧ топки, результаты которого освещаются в настоящей работе.

Во время первого этапа исследования выполнялись измерения падающего на разные точки фронтового экрана НРЧ полусферического лучистого теплового потока. Эти измерения выполнялись при помощи радиометра нестационарного теплового режима [2] при нагрузке котла IOO +2 %.

Анализ результатов измерений показал. что распределение падающего на фронтовой экран НРЧ теплового потока традиционное, в пристенных зонах (700 мм от боковых экранов) падающий тепловой поток около двух раз ниже падающего на том же уровне потока на центральную часть экрана, по высоте топки максимальный тепловой поток зафиксирован в зоне расположения горелок, а IO.3 м выше расположения горелок его значение на 10-15 % меньше. На отметке 19,2 м (1,5 м выше второго яруса горелок) в центре сосредоточения повреждений падающий на экран тепловой поток находился в пределах 426-498 кВт/м2. Сравнение результатов повторных измерений падающего теплового потока, выполненных из одного лючка при неизменном режиме работы топки показал, что он во времени непостоянен. Амплитуда отклонения значений отдельных измерений от среднего достигала +10 %. Это явление потребовало более детального изучения.

Так как радиометр нестационарного теплового режима периодически регистрирует величину падающего на экран теплового потока, то для исследования характера нестационарности излучения факела он непригоден. С этой целью использовался узкоугольный радиометр постоянного действия, конструкция которого описана в [4].

Во время опытов в качестве вторичного прибора использовался многоканальный быстродействующий осциллограф типа H338-6. Ввиду несоответствия выходного сигнала узкоугольного радиометра пределам чувствительности прибора H338-6, он подключался к прибору через специальный усилитель, собранный на полевых транзисторах, усиливающих выходной сигнал узкоугольного радиометра в IO раз.

Результаты измерения через лючки фронтового экрана НРЧ (расположение лючков см. на фиг. I) представлены в таблице I. Длительность отдельных серий измерений составляла от 70 до 240 мин, нагрузка котла во время опытов была I00 ±2 %.

Длительные измерения, выполненные при постоянной нагрузке и неизменном режиме работы котла показали, что средний уровень падающего на конкретные точки экрана лучистого теплового потока постоянен во времени, но текущее его значение пульсирует с различной амплитудой и частотой вокруг среднего. Сравнение результатов измерений, выполненных в разных точках фронтового экрана НРЧ между собой, показывает, что характер пульсаций падающего на поверхность экрана лучистого теплового потока в разных зонах экрана различен. На

фиг. 2 для примера представлены характерные зависимости лучистого теплового потока, пацающего на центральную и пристенную части фронтового экрана НРЧ от времени. Как вилно из представленных зависимостей, в центральной части экрана интенсивность излучения факела наблюдаются колебания с двумя различными периодами. Колебания меньшей амплитуды IMENT период 5-15 с, а колебания большей амплитуды 50-70 (I20)c. При измерениях, выполненных в пристенных зонах экрана, наблюдались колебания только с меньшим периодом, но BO BCEX опытах регистрировались также кратковременные пики длительностью от 5 до IO с со случейным периодом (от 3,5 до IO мин). при которых падающий тепловой поток возрастал до двухкратного значения по сравнению с его средним уровнем. Это явле-

	10			72						
-	101	Inuor	Harpys-	Средний	2-кратная	Marchmand	Период	KDATROB	Demehhhe BI	ыплески
2	Ormer- Ka	Относитель- ное расстоя ние от оси топки	Ka Kotia	поток	амплитуда кодебания	ная отно- сительная вмплитуда	коле- баний	до зна- чения	длитель- Ность	период
	W		MBT	KBT/w2	KBr/w ²	8	U	RBr/w ²	C	HMM
	I3,8	0,86	494	214	I6-48	11,2	5-60	420	5-10	5-9
2	I3,3	0,25	505	370	I6-48	6,5	5-70	1	1	1
02	I3,3	0,25	512	415	8-88	10,6	5-60	1		1
4	I3,8	0,86	508	230	8-34	7,5	5-70	400	5-I0	8-I0
5	I7,3	0,86	503	230	30-40	8,7	5-50	360	5-10	3,5-6
0	I7,3	0,86	500	240	I5-52	I0,8	5-60	480	5-I0	01-6
2	19,2	0,25	506	444	20-40	4.5	5-70	560 ^x	8-12	I0-20
00	19,2	0,25	2II	457	20-56	6,I	5-I20	600 ^X	8-12	I0-20
0	24°I	0,28	498	364	I6-32	4,4	5-25	1	•	1
2	T. 24.I	0,28	498	364	8-3I	4,2	5-25	L	1	1
all	MMedaH	Me: X - Der	истрирова	INCE TOME	ипоисец ох	ICCKM B TCU	ение 25 %	времени	or oftigh	
1			THE PARTY AND A DECK		And a subscription of the local day of t				and a state of the	

2. 2 22 000000000 3 v - ретистрировались только периодически продолжительности измерения. OWWARAWWOTT

* = 0 --

đ H 1 .

1

1

ние связано, на наш взгляд, с набросом факела на экранную поверхность топки.

Наличие колебания интенсивности излучения факела с двумя различными частотами указывает на существование нескольких причин, вызывающих это явление. Можно предположить, что колебания с меньшим периодом вызваны неустойчивостью зоны воспламенения, а колебания с большим периодом - с пульсацией топливно-воздушной нагрузки между отдельными пылесистемами и горелками.

Абсолютные величины флуктуаций падающего на экран лучистого теплового потока по ширине и высоте экрана НРЧ неодинаковы. Максимальные флуктуации наблюдались в средней части экрана на уровне нижнего яруса горелок, где двухкратная амплитуда колебаний достигала 88 кВт/м². На уровне второго яруса горелок соответствующее значение составляло 56 кВт/м² и на уровне стыка СРЧ-НРЧ только 30 кВт/м². Без учета вышеупомянутых кратковременных выплесков максимальная двухкратная амплитуда колебаний падающего на пристенные части фронтового экрана (на уровне горелок) лучистого теплового потока для разных точек измерения колебалась от 24 до 50 кВт/м².

Сравнение же относительных величин показывает, что флуктуации наиболее значительны на участках экрана, расположенных близко от амбразур горелок – там их амплитуда достигает $\pm (7,5-II,2)$ %. В центральной части экрана на уровне нижнего и верхнего ярусов горелок и стыка НРЧ-СРЧ соответствующие значения составляли соответственно $\pm 8,5$; $\pm 5,3$ и $\pm 4,3$ %.

Влияние флуктуации падающего на экран лучистого теплового потока на температурный режим металла труб и теплонапряженное состояние анализируется в [3].

Литерат ура

I. Котельные и турбинные установки энергоблоков мощностью 500 и 800 МВт. Создание и освоение. Под ред. В.Е. Дородука и В.Б. Рубина. М., Энергия, 1979. 680 с.

2. Эпик И.П., Отс А.А. Измерение интенсивности излучения факела радиометрами нестационарного теплового режима. Изв. АН ЭССР. Серия техн. и физ.-мат. наук, 1963, т. 12, № 1.
3. Сууркууск Т.Н., Тоуарт Р.В. Исследование напряженного состояния металла экранов НРЧ топки котла СКД при сжигании экибастузского угля. См. наст. сб., с. 55.

4. Микк И.Р., Вийльман И.Р., Тийкма Т.Б. О некоторых радиационных характеристиках среды в газоходе парогенератора МГД-электростанции. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1984, № 579, с.69.

T. Suurkuusk, I. Viilmann

Researching the Flame Radiation in the Lower Part of the Boiler N-57 Furnace

Summary

The results of the experimental research of the radiant heat flux to the surfaces of the lower part of the boiler Π -57 furnace are presented.

The distribution of the flame radiation intensity along the furnace width and height and also the flame pulsation in time are determined.



₩ 600

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУЛЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.039:524.2.034

Р.А. Круус, М.М. Кууск, Х.А. Кяар, Ю.Л. Саранди, А.Х. Таукар

ОПЫТНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ГРАФИТОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕЛЛООЕМЕНА

Проблема образования графитовых отложений на наружных поверхностях теплообмена относится к ядерным энергетическим **установкам** (ЯЭУ) с высокотемпературными газовыми реакторами (ВТГР), где в качестве тепловыделяющих элементов (твэлы) поименяются твэлы шарообразной формы. В качестве теплоносителя в ЯЗУ типа АБТУц-50 используется гелий. При циркуляции твэлов по урановорадиационному контуру (УРК) между активной зоной ВТГР и облучателем радиационно-химической установки графитовые частицы, выпадающие из оболочки твэлов, образуют в результате истирания полидисперсную (І...25 мкм) графитовую пыль, которая выносится гелиевым теплоносителем из УРК и активной зоны реактора и осаждается, главным образом, под влиянием сил инерции и термофореза [I-3], на поверхностях теплообмена парогенератора. В условиях ВПГР, где коэффициенты теплоотдачи как на внутренней, так и на внешней поверхностях теплообмена весьма высокие (1000-4000 Вт.). эти отложения представляют собой весьма существенную часть теплового сопротивления теплопередачи.

При разработке установки АБТУп-50 возникла серьезная проблема влияния графитовой пыли, содержащейся в потоке гелия, на теплогидравлические характеристики парогенератора. Для обоснованного проектирования оборудования необходимо иметь сведения о тепловой эффективности поверхности теплообмена в условиях снижения теплопередачи при образовании отложений.

Важными дополнительными параметрами являются также скорость образования отложений, время их стабилизании, возможные эффекты самоочистки труб парогенератора, механические свойства отложений и т.д.



Для исследования выпеуказанных процессов и получения необходимых данных, которые не представляется возможным получить чисто расчетным путем, создан опытный стенд. Стенд представляет собой контур, соединяющий основные элементы для обеспечения необходимых тепло- и массообменных условий в опытном блоке. При разработке конструкции стенда возникли определенные трудности в части моделирования. Поверхность теплообмена парогенератора установки АБТУн-50 состоит из 91 модуля, которые расположены в треугольной реметке с шагом 136 мм. Каждый модуль представляет собой однозаходную спираль, навитую на цилиндрический вытеснитель [4]. Полное моделирование в лабораторных условиях такой конструкции, т.е. выполнение всех гидродинамических, геометрических и тепловых условий работы парогенератора практически неосуществимо. Поэтому представилось целесообразным внести некоторое упрощение в части геометрии поверхности нагрева, а именно, моделировать обтекание поверхности нагрева потоком гелиевого теплоносителя как обтекание ряда коридорно-расположенных труб. Стенд предусмотрен для работы при давлении гелия 4,0 MIIa максимальной температурой потока 800 °С и скоростью потока в опытном блоке ДО 20 м/с, т.е. при действительных параметрах парогенератора. Газовый контур стенда является замкнутым, а контур для графитовой пыли - разомкнутым. Циркуляция гелия в контуре производится с помощью гелиодувки, а заполнение контура и восполнение утечек за счет гелиевых баллонов (фиг. I). Из гелиодувки I газ с расходом (I-2)·10⁻³ м³/с (давление 4 МПа, температура 50 °C) направляется в регенератор 3. проходя частично (или полностью) через систему охлаждения электродвигателя гелиодувки 2. Двигаясь в регенераторе, газ нагревается до IOO ^оС и направляется в электронагреватель 4. где нагревается до 800 °С. Другой, значительно меньший по расходу поток проходит параллельно через дозатор графитовой пыли 5 и присоединяется к основному потоку. Поток, теперь уже содержащий графитовую пыль, направляется в опытный блок 6, где охлаждается с 800 до 600 °С. Далее поток газа с частицами графита поступает в регенератор 3, охлаждается там до температуры 250 °С и в водяном охладителе 7 проискодит дальнейшее охлаждение потока до 50 °С. После водяного охладителя гелиевый поток проходит через рукавной

фильтр 8. где очищается от графитовой пыли. В цеолитовых фильтрах 9 и 10 происходит осушка газа от водяных паров. Очищенный от графитовой пыли и водяных паров гелиевый поток направляется на вход гелиодувки І. Фильтры 8, 9 и 10 находятся на байпасных линиях, что позволяет пропустить газовый поток частично или полностью через них, а также минуя их. например. при опытах с чистым гелием. Стенд снабжен соответствующей арматурой и измерительными приборами. позволяющими проводить эксперименты при различных условиях (чистый газ. либо газ с частицами графита) и при широких интервалах изменения скорости, температуры и KOHцентрации графитовой пыли в потоке газа. Стенд соединяется с атмосферой вентилями, через которые также возможно Baкуумировать контур до впуска газа. Основной контур стенда выполнен из труб стали марки IXI8HI0T диаметрами 21/27 мм. а линии осушки газа, дозировки графита и вспомогательные (к измерительным приборам) из труб диаметрами 8/10 мм. Ниже приводятся описания и характеристики отдельных элементов стенла.

Опытный блок

При разработке конструкции опытного блока был учтен ряд специфических требований. Во-первых, необходимо было предусмотреть возможность удобного демонтажа блока после опытов по изучению образования графитовых отложений с целью проведения дальнейших исследований по свойствам и структуре их на обтекаемых зондах. Во-вторых, ряд измерений по определению скорости потока и концентрации пыли в потоке целесообразно проводить при помощи бесконтактных оптических методов, что требует создания условий для визуального наблюдения потока. Применение гелиевого теплоносителя, как газа высокой текучести, налагает особо жесткие требования как по герметичности всего стенда, так и опытного блока в частности.

Опытный блок (фиг. 2) представляет собой камеру наружным диаметром 180 мм и длиной 496 мм внутри которой имеется полость прямоугольного сечения размерами 62х80 мм. Стенки полости покрыты блоками изолянии 5 из шамотно-волокнистых плит ШВП (в кожухах из тонколистовой стали), между которыми образуется канал прямоугольного сечения размерами



50 х 26 мм. В канале, на участке поимерно одной трети длины канала, находятся опытные зонаы 3 и 4, которые крепятся к комике 2. Комика коепится к коопусу блока І шпилечным соелинением. Для обеспечения герметичности в пазу межну коншкой и корпусом предусмотрена прокладка из отожженной меди. Зонин - наружным диаметром 22 мм - имеют системы охлаждения, позволяющие изменять температуру наружной поверхности зондов. Шесть зондов образуют ряд коридорно-расположенных труб с продольным относительным шагом 1,25. Два из них являются неразъемными калориметрируемыми зондами З. Охлаждающая жидкость подается от дозатор-насоса типа НД-0,5 РІ6/63 в SOHI. внутри которого концентрически расположены трубы. На внешней поверхности внутренней трубы прикреплена батарея термопар, спан которых удалены друг от друга на величину изотермического участка в центральной части зонда. Выводы термобатареи загерметизированы эпоксидной смолой в зоне низких температур. Измеряя расход жидкости и перенад температур, можно определить осредненное по периметру зонда количество воспринятого тепла. Зонды оснащены восемью термопарами для определения температурного градиента в стенке трубы, что позволяет определить тепловой поток в нентральной области зонда по известному значению коэффициента теплопроводности материала стенки. Остальные четыре зонда 4 выполнены в виде тепловых труб на воде и на них снаружи можно одеть кольна из различных материалов, различного наружного диаметра. с различными характеристиками обработки поверхности и т.д. Указанные кольца (или их части) являются подложками, Ha которых будут образовываться графитовые отложения. Подоб-Ная конструкция зондов позволяет проволить комплексные исследования свойств отложений, включая толщину, структуру, теплофизические и механические характеристики. Эти четыре зонда (в виде тепловых труб) можно вынимать из оболочек без остановки стенда, что позволяет проводить опыты для изучения отложений как в неизотермических, так и в изотермических условиях. Опытный блок расположен вертикально и Haправление потока сверху вниз. Блок снабжен четырьмя парами оклаждаемых окон 6 для проведения оптических измерений для визуального наблюдения за образованием отложений.

Гелиодувка

Выбранные параметры опытного стенда с его гидродинамическими характеристиками (сравнительно малый расход газа при высоком давлении в контуре) позволяет применить в качестве гелиодувки ротационный пластинчатый компрессор, имеюций приводом герметичный электродвигатель мощностью N = = 2,8 кВт с числом оборотов n = 3000 об/мин. Шилинпрический корпус I (фиг. 3) крепится шестью сквозными, yepes корпус проходящими шпильками 4 к фланцу, который, CBOЮ B очередь, крепится к фланцу электродвигателя. С другой стороны, к корпусу I прижимается гайками через шпильки крышка компрессора. В рабочей полости компрессора. в шилиндрической камере диаметром 65 мм находится насаженный на BAJ электродвигателя и закрепленный шпоночным соединением M контргайкой ротор 2 компрессора. Ротор диаметром 60 мм И длиной IOO мм расположен эксцентрически по отношению к корпусу. В пазах ротора установлены скользящей посадкой графитовые пластинки З. Пластинки изготовлены из графита марки АТГ размерами IOOxIOx4 мм. Снаружи гелиодувка снабжена 0%-



Фиг. 3. Гелиодувка: i - корпус; 2 - ротор; 3 - графитовая пластинка; 4 - шпилька.

лаждающей водяной рубашкой. Электродвигатель гелиодувки охлаждается проходящим через щелевой канал между ротором и статором гелиевым потоком, а также водой снаружи корпуса электродвигателя.

Дозатор

Дозатор предназначен для дозированной подачи графитовой пыли в поток гелия основного контура стенда с целью обеспечения в потоке необходимой концентрации пыли с заданным фракционным составом. На стенде применяется дозатор механического типа.

Дозатор состоит из основных частей (фиг. 4):

- внешний корпус 2
- бункер графитовой пыли I
 - дозирующий механизм

Внешний корпус представляет собой пилиндрический COсуд из стали 12ХІ8НІОТ с внешним диаметром 195 мм. Сверху корпус закрывается крышкой с помощью шпилек, а снизу **HMCET** приваренное дно, через которое проходит горловина приемной воронки З дозирующего механизма. С одной стороны, KODIIVC присоединен через боковой штуцер к гелиевому контуру непосредственно после гелиодувки и в нем поддерживается давление гелия, равное номинальному давлению в контуре; с другой стороны, через трубку 4 графит подается в трубопровод гелия перед опытной камерой, где давление несколько ниже. чем в самом дозаторе.

Во внешнем корпусе находится бункер графитовой пыли I, который опирается на внутренний выступ корпуса верхним своим краем. Объем бункера около 7 литров. Снизу, к нижнему краю бункера, прижимается дозирующий диск 5. Дозирующий механизм представляет собой комбинацию двух храповых механизмов, один из которых является дозирующим. Приводом для этих механизмов служит электромагнит 6.

Засыпанная в бункер I графитовая пыль заполняет канавку и отверстия дозирующего диска 5, которые находятся в зоне бункера. Всего дозирующий диск имеет I20 отверстий диаметром 2 мм, но так как он установлен не по оси бункера, а эксцентрично, то в зону бункера попадает только часть канавки и отверстий диска. Для того, чтобы в бункере не происходи-

ло зависание графитовой пыли, дозирующий диск имеет в центре навинченный наконечник 7 в виде разрыхляющей крыльчатки.

Дозирующий диск выносит графитовую пыль, заполняющую канавку и отверстия, из бункера в дозирующий пересыпной узел. Этот узел образуется из находящихся соосно отверстий дисков 5, 8, храпового колеса 9 и отводящих трубок I0 и II.



Фиг. 4. Дозатор:

 бункер графитовой пыли; 2 – внешний корпус; 3 – приемная воронка; 4 – трубка; 5 – дозирующий диск; 6 – электромагнит; 7 – крыльчатка; 8 – неподвижный диск; 9 – храповое колесо; 10, 11 – отводящие трубки; 12 – воронка; 13 – уровнемер; 14, 15 – клеммы. Так как вращаются только дозирующий диск 5 и храповое колесо 9, а диск 8 неподвижен и имеет одно, соосное с отводящими трубками отверстие, то от скорости вращения храпового колеса и дозирующего диска зависит количество графитовой пыли, которое сыплется через отверстия в трубку 10. Давление гелия в дозаторе несколько выше, чем в трубопроводе, куда дозируется графит, и графитовая пыль сыплется не только под действием собственного веса, но и за счет разницы давлений. Трубка II над дозирующим диском предназначена для отвода части графитовой пыли, которая может подняться во взвешенном состоянии над диском. Через трубки I0 и II графитовая пыль проходит воронки I2 и 3 и эжектируется – вдувается в трубу гелиевого контура.

Уровень графита в бункере, а следовательно, и расход графита определяется электрическим уровнемером IЗ. Крышка корпуса дозатора имеет герметичные проходы для клемм уровнемера (15) и электромагнита (16). С изменением частоты тока, питающего электромагнит, можно в требуемых пределах дозировать расход графитовой пыли в поток гелия. Бункер I вместе с прикрепленным к нему через пружинные подвески дозирующим механизмом и приемной воронкой I2 легко вынимается из корпуса дозатора, что позволяет производить быстрое и удобное заполнение бункера дозатора графитовой пылью вне корпуса дозатора. Дозатор предусмотрен для работы без дополнительной загрузки пыли в бункер во время эксперимента. Дискретно-непрерывная работа дозирующего механизма частотой I - 5 Ги обеспечивает равнометную подачу пыли в сравнительно большом диапазоне изменения концентрации графита в потоке.

Регенератор и охладитель

Регенератор, как и охладитель состоит из трех основных элементов:

- цилиндрический корпус I наружным диаметром 152 мм и толщиной стенки 25 мм, имеющий плоское днище и сверху прикрепленную к верхнему фланцу шпилечным соединением крышку (фиг. 5);

- змеевик 2 диаметром в осях 82 мм из трубы I6xI мм (I6x2 мм - у охладителя);



Фиг. 5. Регенератор: 1 - корпус; 2 - эмеевик; 3 - вытеснитель; 4 - входной штупер, выкодной штупер.

- вытеснитель З из трубы наружным диаметром 60 мм.

Змеевик и вытеснитель приварены к крышке. Вход и выход греющей (или охлаждаемой) среды происходит через штуцера,которые также приварены к крышке.

Высота корпуса генератора II77 мм, а для охладителя 570 мм.

В регенераторе нагреваемая среда – гелий, который нагревается от 50 до 400 ^оС и движется в змеевике 2. Греющая среда (охлаждаемый гелий) входит через штупер 4 и, двигаясь в кольцевом канале между корпусом и вытеснителем, омывает поперечно змеевик, а затем, поднимаясь по внутренней полости вытеснителя, омывает продольно выходящую прямую трубу змеевика и выходит через штупер 5. При этом температура охлаждаемого гелия понижается от 600 до 250 °C.

Корпус, змеевик, вытеснитель, днище, верхний фланец и крышка изготавливаются из аустенитной стали марки IXI8HIOT. С целью уменьшения потерь тепла в окружающую среду, а также по соображениям техники безопасности корпус регенератора заключен в изоляционную обечайку.

Змеевик регенератора изготовлен из тонкостенной трубы I6xI, обеспечивающей приемлемую скорость гелиевого потока в змеевике. В технологическом процессе изготовления змеевика не удалось исключить появления некоторой овальности трубы в поперечном сечении, что привело к понижению скорости гелиевого теплоносителя с наружной стороны змеевика и ухудшению теплопередачи в регенераторе.

Охладитель по принципу работы является гелий-вода теплообменником. Охлаждаемый гелий в охладителе омывает змеевик 2, двигаясь в кольшевой цели между корпусом и вытеснителем. Хладоагент, вода, движется внутри змеевика и нагревается от ,18 до 80 °C. Так как температуры теплоносителей в охладителе сравнительно невысокие, то отсутствует надобность включать его в изолящионный кожух.

Электронагреватель

Нагревательный элемент электрической мощностью 18 кВт выполнен из нихромовой проволоки диаметром 2 мм. Нагревательный элемент присоединяется к клеммам, которые проходят через фланец в нижней части нагревателя и к которым присоединяется токопровод. Электропитание нагревателя осуществляется через шкаф тиристоров, снабженный тиристорами типа ТЛ-200. Тиристорный регулятор напряжения состоит из силовой и управляющей части. Выходное напряжение преобразователя зависит от задержки управляющего импульса. Схема разработана на базе операционных усилителей, логических элементов и транзисторов.

Вокруг нагревательного элемента засыпка из алундовых шариков диаметром 4-5 мм, которые заполняют внутреннюю полость нагревателя и служат как для выравнивания температурного поля с увеличением поверхности теплообмена, так и каркасом для нагревательного элемента. Для защиты электропро-

antionicity, and which the solid state and the solid states the

водки от высокой температуры фланец нагревателя имеет водяное охлаждение. Относительно низкая температура этого фланца позволяет применять в нем прокладку из фторопласта.

Электронагреватель представляет собой цилиндрический сосуд с корпусом, аналогичным корпусу регенератора. Для изолирования корпуса от высокотемпературного гелия, внутри корпуса между днищем и фланцем зажата внутренняя обечайка, труба Ø 90х2 из жаропрочной стали, между которой и корпусом образуется щель шириной 6 мм. Входящий поток гелия с температурой 560 °C поступает через штупер в боковой стенке корпуса в указанную щель и по спиральному каналу, образованному между трубой и корпусом, движется в нижнюю часть нагревателя, где через отверстия в нижней части проходит во внутреннюю полость нагревателя. Здесь, проходя через набивку из алундовых шариков окружающую нагревательный элемент, гелий, нагретый до 800 °C, вытекает через верхний центральный штуцер.

Рукавной фильтр

Графитовую пыль, которая не осаждается в опытной камере, в регенераторе и в охладителе, необходимо удалять изпотока в рукавном фильтре. Рукавные фильтры являются весьма эффективным типом пылеулавливающих устройств, в которых эффект пылеулавливания возрастает по мере коагуляции пыли на фильтровальной ткани. Одновременно наблюдается постепенное увеличение гидравлического сопротивления фильтра, что требует периодической регенерации, т.е. очистки фильтровального элемента.

Рукавной фильтр, используемый на стенде (фиг. 6), состоит из цилиндрического корпуса I, крышки 2 и барабана 3.

Барабан фильтра состоит из верхней и нижней стержневых досок, между которыми установлены 18 стержней, которые приварены к доскам. Из этих стержней 6 находятся на внутреннем периметре барабана, а 12 - на наружном. Сверху и снизу к доскам прижимаются верхняя и нижние крышки барабана. Между крышками и досками зажимаются края внутреннего и наружного, концентрически установленных рукавов фильтра таким образом, что внутренние стержни являются опорным каркасом для внутреннего рукава, а наружные – для наружного рукава. Барабан



очищенный поток гелия

Фиг. 6. Рукавной фильтр: 1 - корпус; 2 - крышка; 3 - барабан.

устанавливается внутри корпуса на пружины, которые опираются на две трубчатые штуцера-опоры. Сверху барабан прижимается коническим пальцем, который входит в центрирующее отверстие в верхней крышке барабана. Запыленный поток подается через боковой штуцер в подбарабанную часть фильтра и направляется на внутреннюю поверхность внутреннего рукава и на внешнюю поверхность внешнего рукава. Очищенный от пыли газ выходит через штуцера-опоры барабана. Площадь фильтрующих элементов (рукавов) фильтра 0,26 м² и скорость фильтрации при расчетной производительности гелиодувки 0,01 м/с.

Цеолитовые фильтры

Присутствие водяных паров в газе может значительно влиять на условия образования отложений [5]. Содержание водяных паров в среде ВПТР оценивается в 4.10⁻⁴ об. % [6], что требует создания эффективных средств по удале-

нию паров воды из потока газа в контуре стенда, так как содержание паров H₂0 в баллонах около 20·10⁻⁴ об. %.

Основными источниками влажности в газовом контуре являются адсорбированная на внутренней поверхности влага из атмосферного воздуха при демонтаже элементов стенда, влагосодержание графитовой пыли, вводимое в контур и влага в баллонном газе.

Для достижения требуемой влажности газа необходимо провести предварительную осушку всего контура и также длительное прокаливание графитовой пыли.

Поддержание уровня влажности в ходе опытов обеспечивается цеолитовым фильтром, который расположен в низкотемпературной части газового контура. В качестве сорбента используется молекулярное сито (цеолит) типа 4Å. Фильтр представляет собой заполненный цеолитом цилиндрический сосуд (корпус) с верхней крышкой. Крышка имеет два штуцера, к одному из которых посредством трубной муфты присоединяется трубка, которая имеет на нижнем, погруженном в цеолит конце отверстия диаметром 2 мм. Гелий проходит через отверстия и засыпку из гранул цеолита и обезвоженный выходит из фильтра.

В конструкции стенда предусмотрена возможность регулирования потока газа, который проходит через цеолитовый фильтр.

Литература

І. Глебов В.П., Богоявленский Р.Г., Виноградов В.П., Гребенник В.Н., Глушков Е.С., Пономарев – Степной Н.Н. Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор ВГР-50 энерго-

химической установки. - Атомно-водородная энергетика и технология, 1982, вып. 5, с. 118-123 .М., Энергоиздат.

2. Богоявленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М., Атомиздат, 1978. II2 с.

3. Молин О.В., Спокойный Ф.Е. Теплообмен цилиндра с поперечным слабозапыленным потоком при наличии сыпучих отложений. - Теплоэнергетика, 1982, № 9, с. 67-68.

4. РТМ 108.300.01-81. Парогенераторы АЭС. Прямоточные с трубами в виде винтовых эмеевиков. ЦКТИ. Л., 1983.

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

6. Скрябин Г.М., Хрулев А.А., Федосеенков А.Н., Чабак А.Ф., Прохоров А.Ф., Жевакин В.В., Гуревич С.Г. Состояние гелиевого теплоносителя и опыт его очистки на экспериментальных стендах ИАЭ им. И.В. Курчатова. - Вопр. атом. науки и техн. Атом.-водород. энерг. и технол. М., 1982, № 2/12, с. 62-65.

> R. Kruus, M. Kuusk, H. Kaar, J. Sarandi, A. Taukar

Experimental Unit for the Study of Graphite Deposit Formations on Heat Surfaces

Summary

The paper gives a description of an experimental unit for the study of graphite deposit formations on heat surfaces. The description is given on the experimental unit as a whole, as well as on all of its composite elements. № 600

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУЛЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 536.2.023.536.631

И.Р. Вийльманн, Х.А. Кнар, М.Ю. Тали

ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРО-ПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Для определения температуропроводности материалов, покрытий, а также отложений, образующихся в различного рода агрегатах, в настоящее время широко применяется т.н. "метод вспышки".

Метод впервые описан Паркером и его сотрудниками в [I-3] как удобный способ измерения коэффициента температуропроводности твердых веществ с достаточной для практических задач точностью ~ 5-17 %.

Длительность единичного опыта данного метода оценивается в пределах секунд и используются маленькие, легко получаемые образцы.

Названный метод был использован для измерения материалов с температуропроводностью от 0,001 до 10 см%с – интервал 10⁴. Температурный интервал метода охватывал температуры от жидкого азота до 2500-3000 К. Толщина исследуемых образнов колебалась от нескольких десятков микрон до нескольких миллиметров.

Метод [1] основан на том, что постоянный по толщине и термически изолированный образен в виде тонкого диска или пластины нагревается коротким импульсом тепла, имеющим однородное распределение энергии по сечению пучка, с последующим определением зависимости температуры тыльной стороны от времени и расчетом температуропроводности из кривой подъема температуры.

Изменение температуры тыльной стороны образиа в случае соблюдения допущений, приведенных в [I], описывается следующим выражением:

$$T(L,\tau) = \frac{Q}{pcL} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left[-\left(\frac{\pi \cdot n}{L}\right)^2 \sigma \tau\right] \right\}, \quad (I)$$

где Q - плотность воспринимаемого образцом потока энергии; L - толщина образиа;

С, О, С - соответственно теплоемкость, плотность и коэффициент температуропроволности образца.

Из уравнения (I) следует, что максимально возможный подъем температуры на тыльной стороне образца:

$$\Gamma(L,\tau)_{max} = \frac{Q}{\rho c L}$$
 (2)

Следовательно, в некоторый момент т температура тыльной поверхности будет увеличиваться на величины:

$$V = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n} \exp(-n^{2} w)$$
(3)
$$w = \frac{\pi^{2} a \tau}{12}$$
(4)

(4)

 $T(L,\tau)/T(L,\tau)_{max}$ - безразмерные параметры.



Фиг. 1. Кривая нарастания температуры на задней поверхности образца.

На фиг. I приведен безразмерный график уравнения (I). представляющий собой ход температурной кривой при условии. что соблюдены указанные граничные условия.

Для момента времени $\tau_{1/2}$, когда $T(L,\tau) = 0.5 T_{regax}$, выражение (I) приводится к виду:

$$\alpha = 1,38 L^2 / \pi^2 \tau_{1/2} = 0,139 L^2 / \tau_{1/2},$$
 (5)

где T1/2 - время, необходимое для того, чтобы температура тыльной поверхности образца достигла половины максимального значения.

В действительности, выражение (5) можно использовать для дюбой части температурной кривой:

$$d = \frac{\kappa_{\chi} L^2}{\tau_{\chi}}, \qquad (6)$$

где К_х - постоянная, соответствующая нарастанию температуры за время τ_x .

Зависимость (I) используется при условии, что продолжительность импульса источника тепла стремится к нулю и отсутствуют тепловые потери с поверхности образца, отклонение экспериментальных данных от приведенных на фиг. I говорит о том, что вышеизложенные условия не соблюдены.

Искажение экспериментальных данных вызвано двумя типами ошибок: ошибки измерения и ошибки, связанные с несоблюдением методических условий.

Основными источниками методических ошибок являются: комечность длительности импульса тепла, тепловые потери с поверхности образца, неоднородный нагрев образца [4, 5].

Ошибки измерений включают сшибки, связанные с определением толщины образца, времени, через которое температура тыльной стороны образца достигнет определенного уровня от максимального. Необходимо учитывать динамические характеристики приборов, а также время стабилизации режима термопар после теплового импульса.

С целью повышения точности метода были предприняты многочисленные попытки исправления и улучшения методики, в частности, касающиеся:

- исправления математической модели, где вычисления проводятся с учетом аксиальной и радиальной составляющих теплового потока через образеи [2];

- использования граничных условий, допускающих тепловые потери в окружающую среду;

- учета формы, однородности и продолжительности импульса [6, 7].

Авторы [4] рекомендуют выбирать толщину образца, исходя из соотношения:

$$L \ge 22\sqrt{\sigma\tau_{u}}$$
,

(7)

где т. - длительность импульса.

Систематическая погрешность в определении коэффициента температуропроводности, связанная с конечностью длительности импульса, будет менее I %. Потери тепла теплопроводностью можно снизить путем закрепления образца в опорах малого сечения. Потери теплоты с боковой поверхности сводятся к минимуму путем его адиабатической изоляции. Авторы работы [7] утверждают, что снижение боковых потерь за счет уменьшения толщины образца сопровождается увеличением влияния "эффекта длительности импульса". Таким образом, существует оптимальная толщина образца для данного материала. Погрешность, связанная с потерями теплоты с открытой поверхности излучением, составляет менее I % (при температурах до I300 K).

Для снижения погрешности, связанной с наличием термопар, необходимо, чтобы оба электрода были близки по своим теплофизическим свойствам, их термоэдс была достаточно высока, а площадь контакта и диаметр минимальны.

Необходимым граничным условием является также требование однородности облучения, при использовании в качестве источника тепла луча лазера. Это достигается установкой между выходным зеркалом и образном выпуклой линзы. Погрешность из-за неоднородности теплового импульса носит случайный характер и может достигать 3 %.

Погрешность измерения времени $\tau_{1/2}$ в лучшем случае не превышает I %, а толщина образца – 0,6 %.

Таким образом, суммарная погрешность единичного измерения составляет примерно 6-7 %.

На фиг. 2 представлена блок-схема установки, реализующей импульсный метод, которая предназначена для изучения теплофизических свойств отложений, образующихся на поверхности труб парогенератора. В качестве источника излучения использовался рубиновый лазер (I) ГОР-ІООМ (длина волны излучения $\lambda =$ = 0,694 мкм; максимальная энергия в импульсе 90-I20 Дх), работающий в режиме генерации свободных импульсов и питаюцийся от источника (2). Лазерный луч от оптического генератора попадал на опытный образец (3), расположенный внутри камеры (4). Вокруг образца находится электрический нагреватель сопротивления для поддержания необходимой температуры опыта. Температура регулируется высокоточным регулятором



5 - регулятор температуры ВРТ-3; 6 - усилитель постоянного тока; 7 - осциллограф; 8 - фото-- лазер ГОР-100М; 2 - источник питания лазера; 3 - опытный образец; 4 - опытная камера; диод, 9 - измеритель ИКТ-IM; 10 - полупрозрачная пластина; 11 - термопара; 12 - сосуд Дьюара; 13 - прибор Ф-30.

температуры ВРТ-3 (5), состоящим из системы ВРТ-2 в комплексе с тиристорным усилителем У-252.

Измерение нарастания температуры на тыльной стороне образца проводится с помощью разнесенной хромель-алимелевой термопары-(ПП) с электродами диаметром 50 мкм.

Сигнал от ТП подается на вход усилителя постоянного тока (6), изготовленного на базе операционного усилителя. Усиленный сигнал регистрируется осциллографом (7) и фотографируется с его экрана. Запуск осциллографа происходит от импульса лазера с помощью фотодиода (8)

Предусматривается возможность определения энергии импульса калориметрическим способом в ИКТ-IM(9). В опытной камере имеется ТП(II), измеряющая температуру опыта. Термоздс ТП измеряется вольтиетром ФЗО (I3). В настоящее время проводится отладка экспериментальной установки и методики измерений на опытных образцах.

Литература

1. Parker W.J., Jenkins R.J., But ler G.B., Abbot G.L. Flash method determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. -Journ. Appl. Phys., 1961, v. 32, N 9, p. 1679-1684.

2. Cape J.A., Lehman G.W. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity. - Journ. Appl. Phys., 1963, v. 34, N 7, p. 1909-1913.

3. W a t t D.A. Theory of thermal diffusivity by pulse technique. - Brit. Journ. Appl. Phys., 1966, v. 7, N 2, p. 231-240.

4. Золотухин А.А., Пелецкий В.Э. Электронное обеспечение импульсных измерений коэффициента температуропроводности. – Промышленная теплотехника, 1981, т. 3, № 1, с. 79-84.

5. Краснов В.Э., Петров Н.А., Харламов А.Г., Юкович В.Н. Новый метод регистрации теплофизических характеристик в импульсном эксперименте.-ТВТ, 1978, т. 16, № 1, с. 82-86. 6. S c h r i e m p f J.T. A laser flash technique for determining thermal diffusivity of liquid metals at elevated temperatures. - Rev. Sci. Instrum., 1972, v. 43, N 5, p. 781-786.

7. Larson K.B., Kayama K. Correction for finite pulse-time effect in very thin samples using the flash method of measuring thermal diffusivity. - Journ. Appl. Phys., 1967, v. 38, N 2, p. 463-474.

I. Viilmann, H. Kaar, M. Tali

The Experimental Equipment for Measuring Thermal Conductivity of the Solid Materials by the Flash Method

Summary

The sources of error for the flash diffusivity method are described in this paper, including measurement errors and boundary conditions (finite pulse time effect, heat losses, and non-uniform heating) which are evaluated as well. It is shown that errors due to finite pulse time, non-uniform heating and heat losses can often be adequately corrected.

The principal scheme and the basic construction elements of the equipment have been elaborated.



№ 600

TAILINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED TPYJH TAJJINHCKOFO NOJINTEXHNYECKOFO NHCTNTYTA

УДК 621.643.2:536.24

А.В. Прикк, А.Э. Хунт, Г.П. Ансон

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ПЕЧИ НА БАЗЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Качество лабораторного исследования высокотемпературной коррозии сталей под воздействием коррозионно-активных соединений в различных газовых средах во многом определяется точностью выдерживания установленных температур в печах. Для повышения качества исследований в проблемной лаборатории промышленной теплоэнергетики ТПИ разработан новый стенд на базе электропечей – тепловых труб (ТТ) с высокоточным регулированием температуры.

Среди разнообразных устройств для передачи тепла тепловые трубы являются во многих отношениях наиболее совершенными [I-4]. В результате высокой теплопроводности ТТ обеспечивают фактически равномерное температурное поле по всей длине трубы. Печи – ТТ отличаются, по сравнению с обычными трубчатыми электропечами, малогабаритностью и удобством регулирования температуры при одновременном заметном росте изотермичности рабочего объема.

Принципиальная схема стенда дается на фиг. І. Стенд состоит из трех печей-ТТ (І) с электрона рево» (З), который регулируется автономно для каждой печи системами высокоточного регулирования температуры ВРТ-З (7). Сигнал для регулирования установленной температуры обеспечивают платино-платинородиевые термопары в центрах нижних частей печей. Параллельно с этим производится регистрация температур в рабочих объемах печей самопищущим потенциометром КСП-4 (поз. I2, ХА-термопары).

Для обеспечения требуемой газовой средой стенд оснащен нагреваемым коллектором (6) и газовой горелкой (II), сжигающей бытовой газ. Воздух для горения подается вентилятором (I0).



разцы; 6 - коллектор; 7 - высокоточный регулятор температуры ВРТ-3; 8 - свловая линия 1 - пежи: 2 - тепловая трубя; 3 - электронагрев; 4 - тепловая каоляция; 5 - оцитине об**щий пот**екциометр КСП-4; 18 - запальное устройство. ХА-хромель-алюмелевые термолары. 8 - автотраноформатор; 10 - вентилятор; 11 - газовая горенка; 12 - самонашу-ПП-платино-платинородиевые термоцары. • • ØML.



Фыт. 2. Печь-тепловая труба.

 калиевая тепловая труба; 2 – обмотке электронагрева; 0-220 В от ВРТ-3; 3 – термошары (ХА в самонивущий потеникометр КСП-4; ІПІ в ВРТ-3); 4 – дополнительный электропологрев гезовой среды, 5 – компектор; 6 – кожух; 7 – съемная крышка; 8 – тепловая изоляция (плиточный ШВП); 9 – тепловая изоляция (порошковый ШВП); 10 – держатель лодочек; 11 – фарфоровые лодочки для опытных образдов; 12 – фитикь. На стенде используются тепловые трубы с калиевым теплоносителем, обеспечивающие практически равномерное температурное поле по длине TT. Печь-TT представляет собой TT кольцевого сечения с диаметром внешней трубы 75 мм (фиг. 2). Рабочая камера печи с диаметром 52 мм выполнена высотой 250 мм. Внутренние стенки кольцевого пространства TT покрыты фитилем (I2) из нержавеющей сетки саржевого плетения. Дистанционирование трубообразных фитилей обеспечивается шестью продольными фитилями. TT заполнены чистым калием (99,9997 % заводской поставки под вакуумом ~I·IO⁻³ мм рт. ст.

Нагрев печей осуществляется нихромовой обмоткой (2), расположенной в фарфоровых изоляторах.

Газовая среда подается в печи через отверстия в нижней диафрагме. Выход газов происходит через центральное отверстие в съемной крышке (7), через которое производится и газовый анализ, измерение расхода газовой среды, а также измерение температур в верхних частях рабочего объема. Скорость газов контролируется расходомером, а состав по избытку воздуха, вычисленному на основе газового анализа.

Для тепловой изоляции ТТ (I) используется порошковый ШВП (9), а для изоляции крышки (7) и газового коллектора (5) плиточный ШВП (8).

Тарировочные опыты

Далее представляются некоторые результаты тарировочных опытов, проводимых для определения границ изотермических зон в рабочих объемах печей. Для определения температурных полей по высоте и диаметру рабочего объема использовались ХА-термопары. На фиг. З изображены, в качестве примера, поля температур в печи № 2 при установленной температуре 500 °C. В режиме I газовый тракт печи был закрыт снизу; доступ воздуха в печь осуществлялся через центральное отверстие в крышке. В режимах 2 и 3 в печь подавались продукты сгорания бытового газа со скоростью соответственно 7 И З см/с при избытке воздуха 1,25. Как видно, проход горячих газов через печь заметно улучшает изотермичность по высоте в центре рабочего объема (термопара t₄) и изотермическая зона поднимается вверх. В то же время изотермичность по



На основи тариличници описов можно оточно, что пачир ПГ и сонотании с одотановии высокоточного (оточновачия теменотури прывахия легия и техно погулируении и мелота баратении. Осов нас столно пиримузируе, то при испольтобаратении (ПТ-) поточесцит баласението рогулирование

IOI

горизонтальным сечениям ухудшается (термопары $t_2 - t_6$). Последнее указывает на необходимость увеличения дополнительного подогрева газов в коллекторе, особенно при более высоких температурах.

На фиг. 4 представлено изменение температур в рабочем объеме печи № 3 при установленных температурах 300-700 °С. Как видно, по мере увеличения установленной температуры изотермичность по высоте рабочего объема улучшается.



Фиг. 4. Изменение температуры в рабочем объеме печи № 3 при t₀ = 300-700 ^оС.

Некоторые сводные данные тарировочных опытов представляются в таблице. На основе этих данных наилучшая изотермичность рабочей зоны получена в опытах с воздушной атмосферой в то время, когда при работе с продуктами сгорания газа при используемых скоростях изотермичность заметно падает.

На основе тарировочных опытов можно отметить, что печи-ТТ в сочетании с системами высокоточного регулирования температуры являются легко и точно регулируемыми и малогабаритными. Здесь необходимо подчеркнуть, что при использовании систем ВРТ-З происходит бесконтактное регулирования питания печей, что исключает пульсирующее колебание температуры, свойственное контакторным схемам регулирования. Таблица

Сводные данные тарировочных опытов Установ-Пределы измерения Средневзвешенная ленная температура в раt2-t6,°C бочей зоне, температура, OC. 00 TIEYB 2 I. Воздух, зона L = 50-I30=80 мм 300 327-337 33T 400 429-440 433 500 528-537 534 600 617-624 62I 700 706-709 708 2. Продукты сгорания бытового газа, а = 1,25, W_=0,072 M/C, 30Ha L = IO-IIO=IOO MM 401-418 400 412 5I2-52T 500 516 604-626 600 6I4 3. Продукты сгорания бытового газа, a = 1,25, Wr =0.032 M/c, 30Ha IO-IIO=IO0 MM 400 408-413 4II 500 509-523 516 600 608-63I 618 ПЕЧЬ 3 I. Воздух, зона L = 50-130=80 мм 300 315-327 320 400 417-425 420 500 516-522 519 600 616 614-618 700 705-707 706 2. Продукты сгорания бытового газа, a = 1,25, ₩_=0,032 M/C, 30Ha L=I0-II0=I00 MM 500 503-524 516

I03

О коррозии стали І2ХІМФ в воздухе

Для проверки работоспособности стенда, а также для получения данных о кинетике коррозии (в первоначальной стадии) стали I2XIM в воздухе при 620 °С проводились опыты продолжительностью до 32 часов. При этом использовался метод определения прироста массы плоских образцов (I0 x 40 x x 3 мм) в течение опыта. Для этого образцы погружались в печи на фарфоровых лодочках (см. фиг. 2), что позволяло собирать без потерь отслоенные в течение опыта кусочки оксидных пленок.



Фиг. 5. Увеличение массы образцов из стали 12Х1МФ при 620 ^оС в воздухе на единицу поверхности в зависимости от времени. 1 - опыты с промежуточными вэвешиваниями образцов, обработанных шкуркой; 2, 4 - образцы обработаны шкуркой, 3 - образцы полированы, 5 - кинетика коррозии при промежуточных восстановлениях первоначального состояния поверхности.

Процесс высокотемпературной коррозии разделяется на первоначальную и основную стадии. Для формирования на чистой поверхности металла оксидной пленки со стабильными диффузионными свойствами требуется т.н. время релаксации процесса коррозии. Последнее и считается первоначальной стадией процесса коррозии. К этой стадии относятся и рассматриваемые опыты. На фиг. 5 представлена зависимость увеличения массы образцов на единицу поверхности (q_n) от времени (т) как в опытах с промежуточными взвешиваниями образцов через каждые 2, 4, 8, 16 и 32 часов от начала опыта (точки I), так и в опытах без промежуточных взвешиваний образцов с общей продолжительностью 2, 4, 8 и 16 часов (точки 2-4). В последних, для получения данных о влиянии качества обработки поверхности образцов на скорость коррозии в начальной стадии окисления использовались образцы, обработанные шкуркой П2Г (ГОСТ 6456-75, точки 2 и 4) и образцы, полированные алмазной пастой АСМ-З до зеркального блеска (точки 3).

На основе этих результатов видно, что в данном случае образование оксидной пленки со стабильными диффузионными свойствами не прошло до конца. При этом можно отметить,что скорость коррозии сильно зависит от качества обработки поверхности образцов. Образцы с полированной поверхностью (кривая 3) корродируются заметно медленнее образцов, обработанных шкуркой (кривые 2 и 4). Уменьшение скорости коррозии полированных образцов можно объяснить уменьшением поверхностных микродефектов, а также уменьшением общего количества центров концентрации напряжения и суммарной активной поверхности, участвующей в процессе окисления.

0 сильном влиянии состояния поверхности образцов на скорость коррозии в первоначальной стадии говорят и результаты, полученные в опытах с промежуточными взвешиваниями. Для промежуточного взвешивания образцы извлекались из печей. что сопровождалось быстрым охлаждением их поверхности. Вследствие последнего произошло отслаивание верхнего слоя оксидов. особенно после первых 2 и 4 часов. Это значит, что при каждом промежуточном взвешивании изменялось состояние поверхности образца. В этих опытах, начиная с 16 часов от начала опыта наблюдалось начало образования более-менее стабильной оксидной пленки (заметно уменьшилось отслоение кусочков оксидов). Кинетику коррозии в таких условиях изображает кривая I на фиг. 5), находящаяся между кривыми 2 (те же образны без промежуточных охлаждений) и 5. Кривая 5 получена графическим путем и иллюстрирует ход коррозии этих же образцов в случае. когда в наждом промежуточном охлаждении образнов произошло бы восстановление первоначального состояния их поверхности.



Фит. 6. Кинетическая днаграмма увеличения массы образцов на единицу поверхности - сталь 12Х1МФ в воздухе при 620 °С. Обсзначения см. на фиг. 5.

На фиг. 6 в координатах lgq_n-lgt приведена кинетическая диаграмма увеличения массы образцов из стали I2XIMO при температуре 620 ^оС на воздухе. На основе этих данных рассчитаны множители lng и n уравнения:

$$\ln q_n = \ln q + n \ln \tau. \tag{I}$$

Как видно, показатель степени окисления о не зависит от качества первоначальной обработки поверхности образцов, изменяется лишь wножитель log, характеризующий влияние начальной стадии окисления на процесс коррозии.

В заключение можно отметить, что использованием при лабораторных исследованиях высокотемпературной коррозии сталей печей тепловых труб в сочетании с высокоточным регулированием температуры обеспечивается получение более точных результатов. В рассматриваемых опытах колебания температуры не превышали класса точности используемых приборов.
Литература

I. Дан П., Рей А. Тепловые трубы. М., Энергия, 1979. 272 с.

2. Ч и С. Тепловые трубы. Теория и практика. М., Машиностроение, 1981, 207 с.

З. Ивановский М.И., Сорокин В.П. и др. Технологические основы тепловых труб. М., Атомиздат, 1980. 160 с.

4. Ивановский М.И., Сорокин В.П. и др. Физические основы тепловых труб. М., Атомиздат, 1978.

A. Prikk, A. Hunt, G. Anson

Isothermal Heat-Tube Furnaces

Summary

The construction and the adjustable results of new laboratory unit based on the heat-tube furnaces with high-precision temperature regulation for studying the steels high-temperature corrosion are presented. The results of investigation of 12X1MØ steel initial stage corrosion in air are expounded.

Содержание

I.	Арукола Х.Х., Ыйспуу Л.М. Статистический анализ	
	ца на электростанциях	3
2.	Пику Т.К., Отс А.А., Разор К.Э. Влияние конст- рукционных параметров центробежно-отражательной мельницы на гранулометонческий состав мельнично-	
LER I	го продукта	21
3.	Лоосаар D.M., Егоров Д.M. Образование окислов азота при пылевидном сжигании эстонского горо-	33
4.	Таукар А.Х., Кууск М.М. Сцепление графитовых частиц с металлической поверхностью в неизо- термических условиях.	41
5.	Отс А.А., Прикк А.В., Тоуарт Р.В. Коррозия ста- лей в продуктах сгорания газа под воздействием поташа.	47
6.	Сууркууск Т.Н., Тоуарт Р.В. Исследование напря- женного состояния металла экранов НРЧ топки котла СКД при сжигании экибазтузского угля	55
7.	Сууркууск Т.Н., Вийльманн И.Р. Исследование характера излучения факела в НРЧ топки котла П-57	65
8.	Круус Р.А., Кууск М.М., Кяар Х.А., Саранди Ю.Л., Таукар А.Х. Опытный стенд для изучения образо- вания графитовых отложений на поверхностях теп- лообмена.	73
9.	Вийльманн И.Р., Клар Х.А., Тали М.D. Опытная установка для определения температуропроводно- сти тверлых материанов импульсным метолом.	89
I0.	Прикк А.В., Хунт А.Э., Ансон Г.П. Изотермиче-	
	ские печи на базе тепловых труб	97





LIGHA 80 KON.