

№ 6.7  
352

TALLINNA POLYTEHNILISE  
INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 352

# ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Сборник статей

XIV

ТАЛЛИН 1973



Ep.6.7

TALLINNA POLITEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 352

1973

УДК 621.180

# ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

## СБОРНИК СТАТЕЙ

XIУ

Таллин 1973

С о д е р ж а н и е

	Стр.
1. Ингерманн К.И., Арро Х.Х., Отс А.А. О коррозионной активности отдельных компонентов натрубных отложений, образующихся в котлах-утилизаторах медеплавильных заводов.....	3
2. Егоров Д.М. Исследование горения частиц кокса горючего сланца.....	15
3. Вальдма Л.Э., Тюманок А.Н., Пирсо Я.М., Кудрявцев В.А., Нанитс М.Х. О геометрии входных каналов центробежного расщепителя.....	23



© ТПИ, Таллин, 1973

УДК 620.193.46

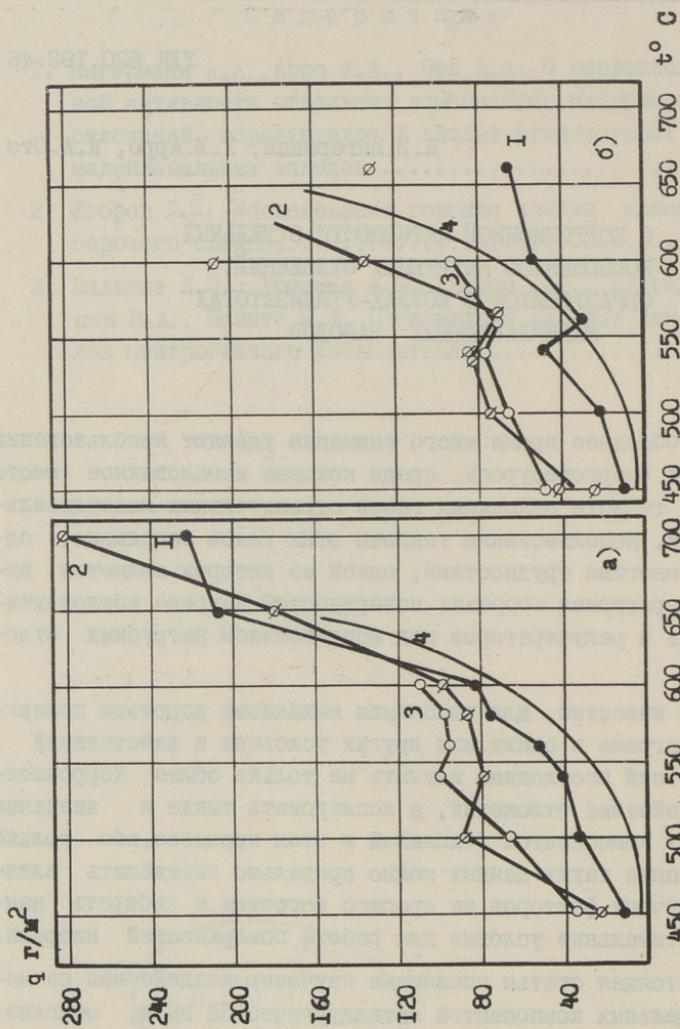
К.И.Ингерманн, Х.Х.Арро, А.А.Отс

О КОРРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ  
КОМПОНЕНТОВ НАТРУБНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ,  
ОБРАЗУЮЩИХСЯ В КОТЛАХ-УТИЛИЗАТОРАХ  
МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ЗАВОДОВ

В последнее время много внимания уделяют использованию вторичных энергоресурсов, среди которых немаловажное место занимает теплота отходящих газов отражательных медеплавильных печей. Использование теплоты этих газов сопряжено, однако, с многими трудностями, одной из которых является высокотемпературная коррозия поверхностей нагрева котлов-утилизаторов и рекуператоров под воздействием натрубных отложений.

Как известно, для выяснения механизма коррозии поверхностей нагрева в одних или других условиях и действенной борьбы с ней необходимо изучать не только общее коррозионное воздействие отложений, а исследовать также и значение отдельных компонентов отложений в этом процессе, ибо только на основании таких данных можно правильно определить влияние различных факторов на процесс коррозии и выбирать наиболее оптимальные условия для работы поверхностей нагрева.

Настоящая статья посвящена изучению воздействия на металл отдельных компонентов металлургической пыли, отложившейся на поверхностях нагрева котлов-утилизаторов типа "Стерлинг" Красноуральского медеплавильного комбината. Для этой цели использовались две пробы пыли, из которых первая (проба № 1) была отобрана с поверхностей пароперегревателя котла № 3, а вторая (проба № 2) с неохлаждаемой перегсродки в районе пароперегревателя этого же котла.



Фиг. 1. Окисление стали 12X1MФ в присутствии различных проб металлургической пыли в течении 48 часов.  
 а - проба № 1; б - проба № 2; 1 - нерастворимая в воде часть, 2 - растворимая в воде часть;  
 3 - исходная проба, 4 - окисление стали 12X1MФ на воздухе, по [1].

Т а б л и ц а I

Результаты химического и рентгенофазового анализа проб пилей, использованных для лабораторных испытаний

Характеристика пробы	Химический состав в %											Минералогический состав
	SiO <sub>2</sub>	Pb	Cu	Fe	Al	Zn	As	K	Na	SO <sub>4</sub>	сульф.	
Проба # I (исходная проба)	3,22	8,00	1,95	4,66	2,12	14,88	7,80	0,17	0,08	29,40		ZnSO <sub>4</sub> , PbSO <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , ZnSO <sub>3</sub> , CuSO <sub>4</sub> , (5PbO·3SO <sub>3</sub> ), (FeAsO <sub>4</sub> )
Растворимая в воде часть пробы # I	0,46	1,39	4,23	0,65	1,51	23,67	2,95	0,38	0,13	54,31		Не определялся
Нерастворимая в воде часть пробы # I	5,70	11,83	0,58	7,20	3,53	3,26	10,09	0,13	0,03	9,71		Не определяется
Проба # 2 (исходная проба)	9,91	6,93	6,86	11,44	2,64	12,98	6,37	0,23	0,10	19,54		ZnSO <sub>4</sub> , PbSO <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuSO <sub>4</sub> , CuO·CuSO <sub>4</sub> , (FeSO <sub>4</sub> )
Растворимая в воде часть пробы # 2	0,97	1,02	9,93	0,96	1,90	18,73	0,60	0,60	0,26	56,04		ZnSO <sub>4</sub> , CuSO <sub>4</sub> , FeSO <sub>4</sub> , PbSO <sub>4</sub>
Нерастворимая в воде часть пробы # 2	12,10	8,91	4,87	15,00	5,04	5,97	8,54	0,13	0,06	7,26		PbSO <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuO·CuSO <sub>4</sub> , (Zn·As <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )

П р и м е ч а н и е: В скобках даны соединения, соответственно которым линии на рентгенограммах были слабыми

Химико-минералогический состав натрубных отложений котлов-утилизаторов медеплавильных заводов существенно отличается от состава отложений, образующихся на поверхностях нагрева энергетических котлов. Как правило, содержание таких общеизвестных коррозионно-активных компонентов, как соединения щелочных металлов, в этих отложениях незначительное, а хлориды и соединения ванадия, играющие также большую роль в процессах коррозии энергетических котлов, обычно отсутствуют. Поэтому, для исследования коррозионной активности отдельных составляющих этих отложений целесообразно прежде всего провести разделение вещества отложений на более узкие фракции с последующим определением химико-минералогического состава и коррозионных свойств последних. Такой метод позволяет обычно ограничивать количество компонентов, более подробное исследование свойств которых необходимо, а в некоторых случаях выясняется при этом также наличие в отложениях таких коррозионно-активных компонентов, содержание которых в исходной пробе незначительно и может оставаться незаметным.

Разделение вещества упомянутых выше проб отложений было проведено по растворимости компонентов в воде. Результаты химических и рентгенофазовых анализов исходных проб и их растворимых и нерастворимых частей, проведенных после нагревания полученных фракций в течение 4 часов при 300 °С, представлены в таблице I. Из этих данных видно, что растворимая в воде часть, доля которой в пробе №1 составляет ~39% и в пробе №2 ~25% обогащается, в основном, цинком, медью и сульфатной серой, в то время как в нерастворимой части остаются преимущественно свинец, железо, мышьяк и кремний. Что касается минералогического состава проб, то данные о кристаллических составляющих отложений и их фракций, обнаруженных при рентгенофазовом анализе, также представлены в таблице I. Однако наличие почти на всех рентгенограммах некоторых линий с малой или средней интенсивностью, расшифровка которых не удалась, говорит, очевидно, о том, что этот список неполный и кроме основных минералов, указанных в таблице I, в пробах должны содержаться в небольшом количестве еще и некоторые другие минералы.

Коррозионные опыты, проведенные путем нагревания в электропечах пластинок 40 x 10 x 3 мм из стали I2X1MФ в присутствии как исходных проб, так и растворимой и нерастворимой частей их показали (фиг. 1), что коррозионная активность растворимой в воде части проб примерно одинакова с коррозионной активностью исходных проб. Что касается коррозионной активности нерастворимой в воде части проб, то она несколько ниже, хотя интенсивность коррозии и в данном случае при температурах примерно до 600 °С также превышает интенсивность коррозии стали на воздухе. Это говорит о том, что при растворении не все коррозионно-активные компоненты переходят в раствор, а некоторые из них остаются, очевидно, в нерастворимой части проб.

Дальнейшие опыты с различной продолжительностью, проведенные с образцами из сталей I2X1MФ, I2X2MФCP, 20 и ЭИ-53I в присутствии пробы № I показали, что коррозионная активность вещества пробы со временем уменьшается, особенно при температурах выше 540 °С. Об этом можно, например, судить по углам наклона прямых, представленных на фиг. 2, описывающих коррозию стали под воздействием пробы и на воздухе. Хорошо видно, что эти прямые пересекаются. Интерес представляет также факт, что увеличение скорости коррозии с повышением температуры где-то после 550 °С резко затормаживается, а иногда наблюдается даже уменьшение интенсивности коррозии, после чего, приблизительно при 600 °С скорость коррозии снова увеличивается. Учитывая, однако, что примерно такое же явление было раньше обнаружено также при кратковременных опытах, проведенных с золой эстонских сланцев, можно предположить, что причиной данного явления может служить не только изменение свойств вещества отложений при этих температурах, а возможно, и изменение свойств оксидной пленки.

Для установления причин потери коррозионной активности отложений при длительных опытах были проведены химические и рентгенофазовые анализы проб пыли, взятых с образцов сталей после 48-часовых опытов. Результаты этих анализов представлены в таблице 2.

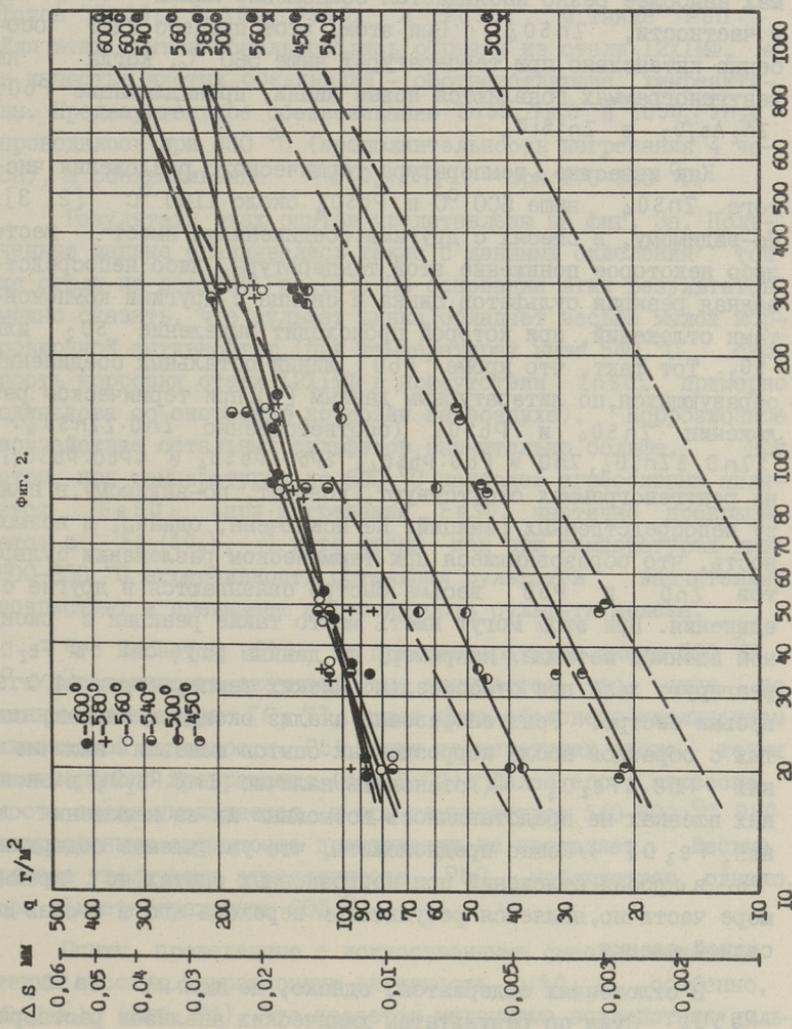
При рассмотрении этих результатов бросается в глаза, что в пробах уменьшается содержание  $SO_4$  и Pb, особенно при более высоких температурах опытов, в то время как содержание остальных компонентов либо увеличивается, либо остается

Таблица 2

Результаты химического и рентгенофазового анализа проб шпиль № I, взятых с отпущенных образцов после 48 часов испытания

Температура испытания, °С	Химический состав в %											Минералогический состав
	SiO <sub>2</sub>	Pb	Cu	Fe	Al	Zn	As	K	Na	SO <sub>4</sub> сульф.		
450°	4,30	6,07	2,08	5,20	2,13	14,74	7,66	0,23	0,07	29,09		ZnSO <sub>4</sub> , PbSO <sub>4</sub> , ZnSO <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), (CuSO <sub>4</sub> ), (5PbO·SO <sub>3</sub> )
500°	4,27	5,11	2,27	5,65	2,50	20,27	7,04	0,22	0,064	30,65		ZnSO <sub>4</sub> , PbSO <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (CuO)
540°	3,77	4,55	1,33	5,62	2,75	15,58	7,48	0,26	0,073	25,29		Не определялся
560°	4,64	4,01	1,17	5,82	2,00	17,98	8,17	0,25	0,075	20,97		ZnSO <sub>4</sub> , PbSO <sub>4</sub> , (CuSO <sub>4</sub> ), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , Zn <sub>2</sub> As <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , PbO, (As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
580°	4,32	3,96	2,39	6,61	2,75	18,38	9,01	0,27	0,080	19,86		Не определялся
600°	5,32	3,89	2,57	6,73	2,35	20,59	7,40	0,28	0,076	14,55		Не определялся
650°	4,07	4,16	2,66	7,74	3,28	17,54	9,52	0,33	0,096	5,49		ZnSO <sub>4</sub> , PbSO <sub>4</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , PbO, (PbO·2Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), (γ - ZnSiO <sub>3</sub> ), (Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )
700°	5,02	3,56	2,00	7,04	2,36	18,15	11,21	0,31	0,082	3,92		Не определялся

Примечание: В скобках даются соединения, соответственно которым линии на рентгенограммах были слабыми



Фиг. 2.

Фиг. 2. Кинетическая диаграмма окисления стали 12Х1МФ в присутствии пробы № 1. Пунктирными линиями отмечено окисление стали 12Х1МФ на воздухе, по [1].

постоянным. На основании этого можно, по-видимому, предположить, что коррозионная активность отложений прежде всего связана с вышеупомянутыми компонентами отложений.

Что касается минералогического состава проб, то следует отметить, что с повышением температуры на рентгенограммах наиболее резко наблюдается ослабление линий  $PbSO_4$  и, в частности,  $ZnSO_4$ . При этом, этот процесс идет особенно интенсивно при температурах выше  $560^\circ C$ , когда на рентгенограммах появляются новые линии, принадлежащие  $PbO$ ,  $Zn_2As_2O_7$  и  $Zn_2SiO_4$ .

Как известно, температура термического разложения чистого  $ZnSO_4$  выше  $600^\circ C$  и  $PbSO_4$  около  $1100^\circ C$  [2, 3]. По-видимому, в смесях с другими соединениями имеет место либо некоторое понижение этой температуры, либо непосредственная реакция сульфатов цинка и свинца с другими компонентами отложений, при которой происходит выделение  $SO_2$  или  $SO_3$ . Тот факт, что кроме  $PbO$  линии остальных соединений, образующихся, по литературным данным [4], при термическом разложении  $ZnSO_4$  и  $PbSO_4$  (соответственно  $ZnO \cdot 2ZnSO_4$ ,  $2ZnO \cdot 3ZnSO_4$ ,  $ZnO$  и  $PbO \cdot PbSO_4$ ,  $2PbO \cdot PbSO_4$  и  $4PbO \cdot PbSO_4$ ) на рентгенограммах отсутствуют, говорит, по-видимому, в пользу непосредственных реакций. Не исключена, однако, и возможность, что образовавшиеся при термическом разложении сульфатов  $ZnO$  и  $PbO$  весьма быстро связываются в другие соединения. При этом могут иметь место также реакции с оксидной пленкой металла. Например, по данным [5],  $ZnO$  и  $Fe_2O_3$  реагируют даже при относительно низких температурах ( $400^\circ C$ ) весьма быстро. Рентгенофазовый анализ оксидных пленок, снятых с образцов после коррозионных опытов показал наличие в них  $PbO \cdot 6Fe_2O_3$ . (Установить наличие  $ZnO \cdot Fe_2O_3$  в оксидных пленках не представлялось возможным из-за наложения линий  $Fe_3O_4$ ). Можно предположить, что уменьшение содержания  $Pb$  в пробах отложений при коррозионных опытах, по крайней мере частично, является результатом перехода его в состав оксидной пленки.

В отложениях содержатся, однако, не только  $ZnSO_4$  и  $PbSO_4$ . Судя по результатам химических анализов растворимой в воде части проб (учитывалась растворимость компонентов и баланс сульфатной серы), в отложениях должны содержаться в

некотором количестве еще сульфаты меди, железа и алюминия. (На рентгенограммах наблюдались только относительно небольшие линии  $\text{CuSO}_4$ ) Эти сульфаты при нагревании также разлагаются.

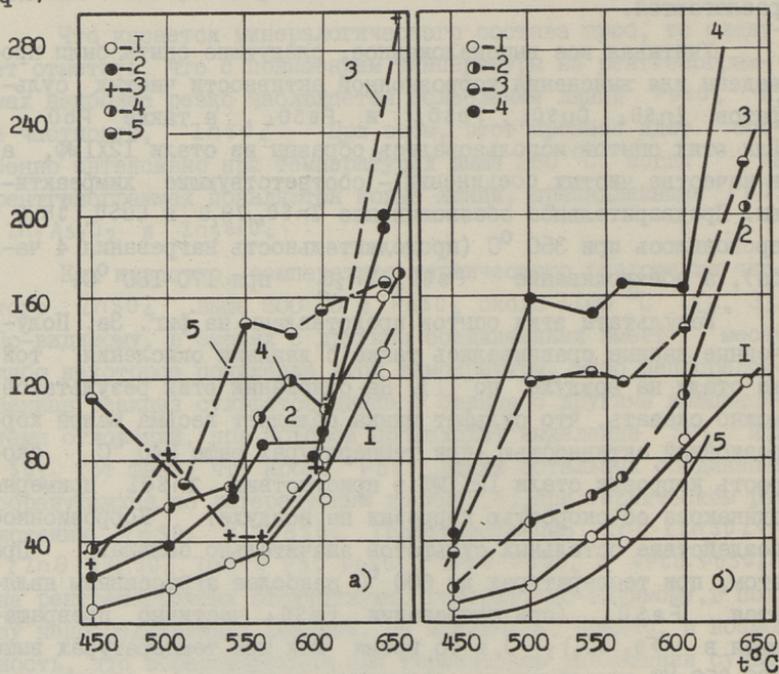
Учитывая все вышеизложенное, следующие опыты были проведены для выяснения коррозионной активности чистых сульфатов  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{PbSO}_4$  и  $\text{FeSO}_4$ , а также  $\text{PbO}$ . Для этих опытов использовались образцы из стали I2XIMФ, а в качестве чистых соединений – соответствующие химреактивы. Предварительное обезвоживание  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  проводилось при  $350^\circ\text{C}$  (продолжительность нагревания 4 часа), а обезвоживание  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  при  $170\text{--}180^\circ\text{C}$ .

Результаты этих опытов представлены на фиг. 3а. Полученные данные сравнивались также с данными окисления той же стали на воздухе по [1]. На основании этих результатов можно сказать, что сульфат цинка обладает весьма малой коррозионной активностью (при температурах выше  $540^\circ\text{C}$  скорость коррозии стали I2XIMФ в присутствии  $\text{ZnSO}_4$  примерно одинакова со скоростью коррозии на воздухе). Коррозионное воздействие остальных сульфатов значительно больше. При этом, при температурах до  $600^\circ\text{C}$  наиболее агрессивным является  $\text{FeSO}_4$  (при нагревании  $\text{FeSO}_4$  частично превращается в  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ), в то время как при температурах выше  $600\text{--}650^\circ\text{C}$  агрессивность остальных сульфатов значительно возрастает и превышает агрессивность сульфата железа.

Что касается  $\text{PbO}$ , то при температурах около  $500^\circ\text{C}$  его агрессивность скачкообразно повышается, что, судя по данным литературы [6, 7], может быть объяснено увеличением химической активности  $\text{PbO}$  при температурах около точки полиморфного превращения ( $488,5^\circ\text{C}$ ). Далее его агрессивность снова уменьшается и при температурах  $540\text{--}600^\circ\text{C}$   $\text{PbO}$  коррозионную активность практически не проявляет. Весьма резкое увеличение агрессивности  $\text{PbO}$  наблюдается, однако, при температурах выше  $600^\circ\text{C}$ .

Опыты, проведенные с искусственными смесями, показали также высокую коррозионную активность  $\text{CuSO}_4$  и, особенно,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  (фиг. 3б). Что касается механизма воздействия сульфатов железа и меди на сталь, то можно предположить, что важную роль при этом играет  $\text{SO}_3$ , которая выделяется при

q г/м<sup>2</sup>



Фиг. 3. Окисление стали 12X1MФ в течении 48 часов в присутствии разных чистых веществ.

а) 1 -  $ZnSO_4$ , 2 -  $PbSO_4$ , 3 -  $PbO$ , 4 -  $CuSO_4$ , 5 -  $FeSO_4$

б) 1 -  $ZnSO_4 + PbSO_4$  при молярном соотношении 6:1

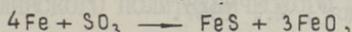
2 -  $CuSO_4 + ZnSO_4 + PbSO_4$  при молярном соотношении 1:7,5:1,25; 3 -  $CuSO_4 + ZnSO_4 + PbSO_4 + Fe_2(SO_4)_3$

при молярном соотношении 1:7,5:1,25:0,13; 4 -  $CuSO_4 + ZnSO_4 + PbSO_4 + Fe_2(SO_4)_3$

при молярном соотношении 1:7,5:1,25:0,43

5 - окисление стали 12X1MФ на воздухе, по [1]

термической диссоциации упомянутых сульфатов. Как известно [8], под воздействием  $SO_3$  может протекать реакция:



а наличие  $FeS$  в оксидных пленках было установлено при рентгенофазовом анализе последних. Вопрос о коррозионном воздействии  $PbSO_4$  более сложен и пока еще не совсем ясен. Ведь опыты с чистыми компонентами показали (фиг.3а), что коррозионное влияние  $PbSO_4$  и, в частности,  $PbO$  при температурах выше  $600^\circ C$  сильно повышается. В то же время коррозионные опыты с нерастворимой в воде частью проб дали результат (фиг. I), по которому скорость коррозии стали в присутствии нерастворимой части проб при этих температурах даже меньше скорости коррозии на воздухе, несмотря на то, что  $PbSO_4$  в основном содержится в этой части. По-видимому, здесь сказывается пока еще неизвестное влияние других компонентов отложений и этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Наконец, следует также отметить, что вопрос, связанный с уменьшением коррозионной активности отложений со временем, потребует промышленной проверки. Ведь в условиях котлоагрегата, при относительно высоком содержании  $SO_2$  и  $SO_3$  в дымовых газах, уменьшение содержания сульфатных соединений в отложениях маловероятно. В то же время некоторое, небольшое колебание их содержания, а следовательно и выделение агрессивной  $SO_3$  в результате, например, колебания температур дымовых газов и поверхностей нагрева вполне возможно. В пользу такой возможности говорит высокое содержание сульфатной серы в исходных пробах отложений, использованных при настоящих опытах, а также большая коррозионная активность их, несмотря на то, что отложения перед взятием проб, по-видимому, долгое время пребывали в газоходах котла. С уменьшением коррозионной активности проб отложений при опытах необходимо, однако, считаться при проведении лабораторных исследований.

### Л и т е р а т у р а

1. Метод расчета жаростойкости конструкционных материалов. Руководящие технические материалы. ЦКТИ им. И.И. Ползунова, Л., 1972.

2. Краткая химическая энциклопедия, т.5. Изд. "Советская энциклопедия", М., 1967.

3. Краткая химическая энциклопедия, т. 4, Изд. "Советская энциклопедия", М., 1965.

4. H.H. K e l l e r, A Critical review of Diffusion Equilibria. Trans. Metallurg. Soc. AIME, vol. 230, No 12, 1964.

5. J. B e r e t k a, M.J. R i d g e, Formation of Zinc Ferrite at Low Temperatures. Nature, vol. 216, No 5114, 1967.

6. F.W. L a m b, L.M. N i e b y l s k i, Formation of Engine Deposit Compounds by Solid State Reactions. Anal. Chem. vol. 23, No 10, 1951.

7. J.A. H e d v a l l, Changes in Crystal Structure and their Influence on the Reactivity and Catalytic Effect of Solids. Chem. Revs., vol. 15, 1934.

8. Р. Л е в и, О. М э р р и м э н. Реакции в системах окислы железа - окислы серы. Труды Ам. об-ва инж.-мех. Энергетические машины и установки, № 2, 1967.

K. Ingermann, H. Arro, A. Ots

On the Corrosiveness of Some Compounds of Deposits  
from Copper Smeltery Waste-Heat Boilers

Summary

The mechanism of high temperature corrosion of low-alloy steels in the presence of copper smeltery waste-heat boiler deposits is considered. The results of chemical and X-ray analyses of deposits, used in the laboratory investigation of boiler steels are given.

It is established that the corrosiveness of the deposits is caused by the synergistic effect of ferric, lead and copper sulphates and also by lead monoxide.

УДК 662.612

Д.М. Егоров

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ КОКСА  
ГОРЮЧЕГО СЛАНЦА

Основную часть горючего, входящего в состав сланцев, составляют летучие горючие вещества. Несмотря на это горение коксового остатка занимает больше времени, чем горение летучих веществ и определяет время горения частиц горючего сланца в целом. Коис горючих сланцев представляет из себя пористый высокзолный материал с небольшим содержанием горючих веществ (порядка 10 - 12 % и меньше). Горение этих коксов изучено сравнительно мало. Наиболее хорошо изучен такой режим, когда скорость процесса определяется в основном скоростью подвода кислорода через образующуюся золную оболочку к фронту горения [1, 2]. На основе экспериментальных данных, приведенных в этих работах, а также на основе математической модели процесса горения пористых материалов с большим содержанием золы в других режимах, разработанной М.А. Гуревичем, И.И. Палеевым и Ю.А. Тимошиным [3], А.А. Отс [4] составил математическое описание горения частиц сланцевого кокса.

М.А. Гуревич и др., составив математическое описание горения частицы кокса высокзолного материала в промежуточной области, предположили, что активная поверхность пор пропорциональна мгновенной плотности горючих и что внутренняя диффузия кислорода при выгорании практически не изменяется.

В ходе изучения выгорания углерода из частиц высокзолных пористых коксов, проведенного в НИ лаборатории дромтеплоэнергетики ТПИ, в основном на искусственных ма-

териалах с различным содержанием горючих, удалось исследовать зависимость внутренней поверхности горения от плотности углерода и на основе этого составить уточненную математическую модель процесса. Проведенные исследования также показали, что проводя расчеты выгорания углерода из высокозольных материалов с содержанием горючих до 70 % в промежуточном режиме, вполне можно пользоваться постоянным значением коэффициента внутренней диффузии кислорода, равным коэффициенту диффузии кислорода в зольном остатке [5, 6, 7].

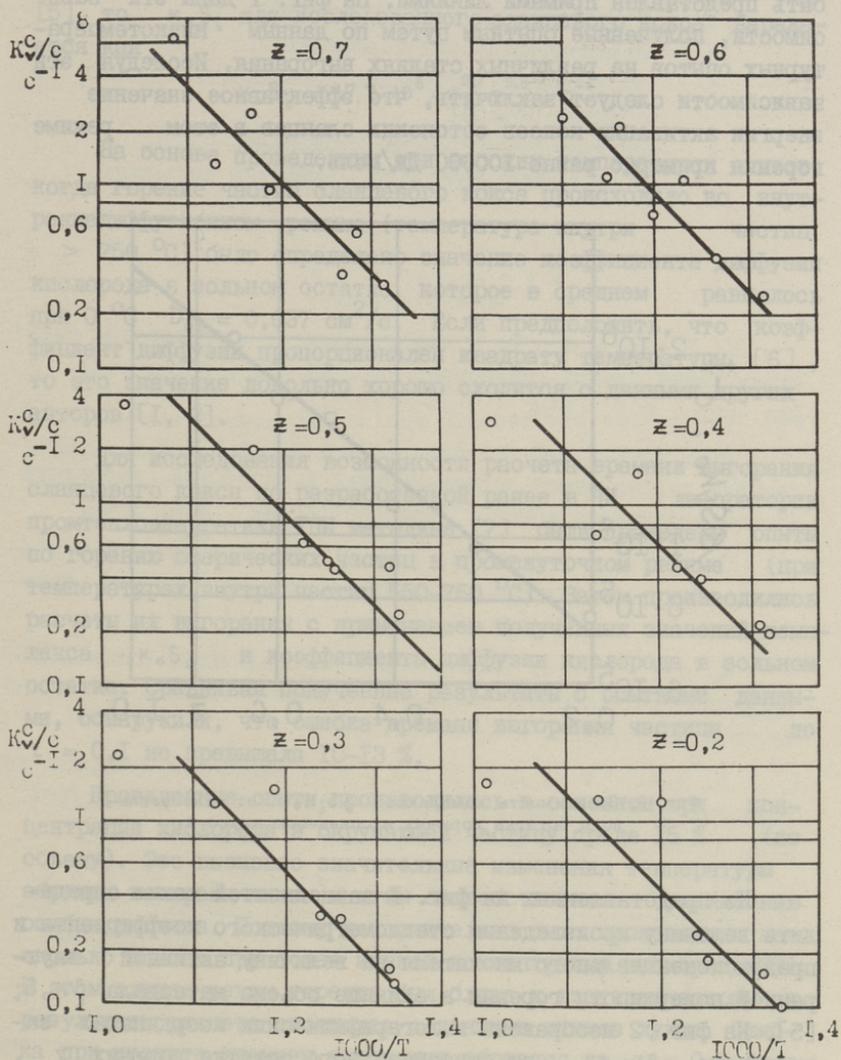
Для проверки применимости разработанной методики расчета выгорания углерода из высокозольных частиц к горению сланцевого кокса были проведены опыты с коксом сланца слоя Б карьера Сиргала.

Из кусков сланца вырезались сферические образцы, которые затем коксовались в атмосфере чистого азота. Температура частиц при этом повышалась до 1100 °С. После коксования образцы калибровались при помощи режущих шайб. Их диаметр был равен 15 мм.

Горение образцов производилось в специальной термомассомеретрической установке, позволяющей записывать изменение их массы во времени, а также температуру в их центре. Концентрация кислорода в газовой среде, окружающей частицы, поддерживалась равной 15 % по объему.

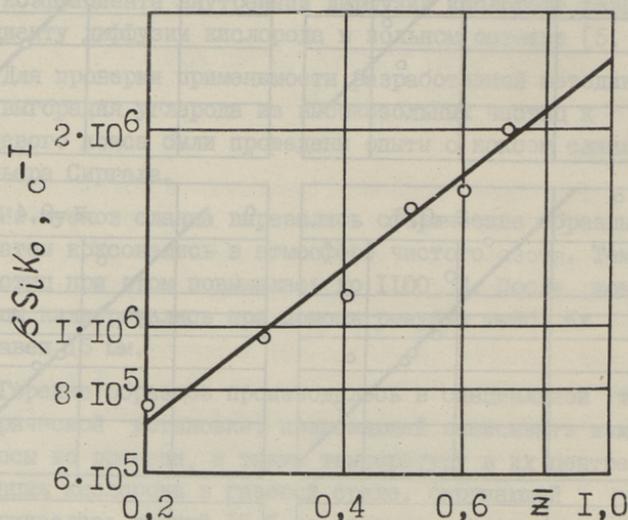
Для того, чтобы исключить влияние на полученные результаты диссоциации карбонатов, производился анализ содержания карбонатной окиси углерода в образцах до и после опытов по выгоранию. По разности определялось количество выделившегося углекислого газа, а затем вычислялись доли изменения массы образцов, которые приходились на выделение  $\text{CO}_2$  из карбонатов и на горение углерода. На основе проведенного таким образом анализа результатов опытов можно было определить количество выгоревшего углерода и скорость его горения.

При исследовании выгоревших частично образцов сланцевого кокса оказалось, что при температурах до 550 °С выгорание углеродных включений по всему объему частицы происходит равномерно. Это значит, что и у сланцевых коксов наблюдается так называемый макровнутреннекинетический режим го-



Фиг. 1. Зависимость объемной скорости выгорания сланцевого кокса, отнесенной к концентрации кислорода  $K_v^c/c$  от обратного значения температуры при различных значениях относительного остатка горючих  $z$ .

рения [5, 7], который в координатах  $\lg K_V^c / c - T^{-1}$  может быть представлен прямыми линиями. На фиг. 1 даны эти зависимости, полученные опытным путем по данным низкотемпературных опытов на различных стадиях выгорания. Исследуя эти зависимости следует заключить, что эффективное значение энергии активации коксов эстонских сланцев в этом режиме горения примерно равно 100000 Дж/моль.



Фиг. 2. Зависимость комплекса  $\beta S_i K_0$  от относительного остатка горючих в сланцевом коксе  $z$ .

Из представленных на фиг. 1 зависимостей можно определить величину произведения стехиометрического коэффициента и предэкспоненциального множителя на величину активной внутренней поверхности горения в единице объема материала  $\beta K_0 S_i$  [5]. На фиг. 2 изображена в логарифмических координатах зависимость  $\beta K_0 S_i$  от относительного остатка горючих  $z$ . Эта зависимость аппроксимируется прямой линией, по наклону которой можно заключить, что комплекс  $\beta K_0 S_i$  пропорционален  $z$  в степени 0,8.

Если считать, что  $\beta = 0,5$  и внутренняя поверхность горения в макровнутреннекинетическом режиме пропорциональна

начальному содержанию горючих в степени, примерно равной 0,7 [5], то  $\kappa_0 S_i$  для исследованного сланцевого кокса выражается как

$$\kappa_0 S_i = 27,2 \cdot 10^6 \cdot \rho_0^{0,7} z^{0,8}, \text{ с}^{-1}.$$

На основе проведенных при высоких температурах опытов, когда горение частиц сланцевого кокса происходило во внутренидиффузионном режиме (температура внутри частиц  $> 750^\circ\text{C}$ ) было определено значение коэффициента диффузии кислорода в зольном остатке, которое в среднем равнялось при  $0^\circ\text{C}$   $D_{O_2} = 0,037 \text{ см}^2/\text{с}$ . Если предположить, что коэффициент диффузии пропорционален квадрату температуры, [6], то это значение довольно хорошо сходится с данными других авторов [1, 2].

Для исследования возможности расчета времени выгорания сланцевого кокса по разработанной ранее в НИ лаборатории промтеплоэнергетики ТПИ методике [7] были проведены опыты по горению сферических частиц в промежуточном режиме (при температурах внутри частиц  $550\text{--}750^\circ\text{C}$ ). Затем производились расчеты их выгорания с применением полученных значений комплекса  $\kappa_0 S_i$  и коэффициента диффузии кислорода в зольном остатке. Сравнивая полученные результаты с опытными данными, обнаружили, что ошибка времени выгорания частицы до  $z = 0,1$  не превышала 10–13 %.

Проведенные опыты производились в основном при концентрации кислорода в окружающей частицу среде 15 % (по объему). Это вызвало значительные изменения температуры образца во время опыта и этим способствовало увеличению ошибки расчета. Поэтому дополнительно было произведено несколько опытов при более низкой концентрации кислорода (7%). В этом случае режим горения был ближе к изотермическому и результаты расчета сходились с данными опытов лучше. Ошибка при расчете времени выгорания образцов до  $z = 0,1$  была не более 6 %.

#### Обозначения

$K_V^C$  – скорость выгорания углерода в единице объема,  
 $C$  – концентрация кислорода,

- $T$  - абсолютная температура,  
 $\rho_0$  - начальное содержание углерода,  
 $Z$  - относительный остаток углерода,  
 $\beta$  - стехиометрический коэффициент,  
 $S_i$  - эффективная внутренняя поверхность горения в единице объема,  
 $K_0$  - предэкспоненциальный множитель,  
 $D_i$  - коэффициент внутренней диффузии кислорода

## Л и т е р а т у р а

1. Л.А. Ш и л о в. О диффузионных и кинетических свойствах кокса сланца-кукерсита. Изв. АН ЭССР, серия техн. и физ.-мат., № 1, 1958.

2. Д.К. Коллеров, Е.С. Авдоница. Определение диффузионной характеристики и скоростей выгорания кусков сланцевого кокса. "Теплоэнергетика", № 8, 1958.

3. М.А. Гуревич, И.И. Палеев, Ю.А. Тимошин. Процесс выжигания горючих добавок из пористых материалов. МТФ, т. 24, вып. 4, 1954.

4. А.А. Отс. Теоретическое исследование горения полифракционной коксовой пыли многозольного топлива с малой плотностью горючих. ИФЖ, № 2, 1968.

5. А.А. Отс, Д.М. Егоров. Выгорание углерода из пористых высокозольных материалов при низких температурах. Изв. АН ЭССР, серия физ.-мат., т. 21, № 3, 1972.

6. Д.М. Егоров, А.А. Отс, И.О. Андреев. Влияние плотности горючих на внутреннюю диффузию при горении высокозольного топлива. Изв. АН ЭССР, серия физ.-мат., т. 21, № 4, 1972.

7. Д.М. Егоров, А.А. Отс. Процесс горения пористого высокозольного кокса и его математическое описание. Труды Таллинского политехнического института, № 339, 1973.

Forschung der Verbrennung der Partikeln  
des Ölschieferkokeses

Zusammenfassung

Im Aufsatz werden die Forschungsergebnisse der Verbrennung der Kokspartikeln des Ölschiefers betrachtet. Die vorliegende Arbeit behandelt auch die Berechnung der Verbrennungszeit des Ölschieferkokeses.



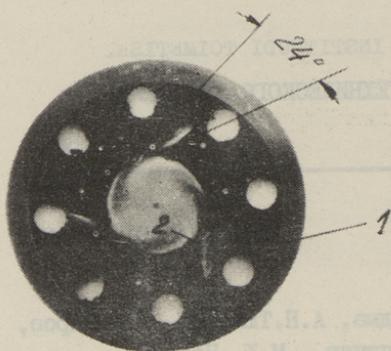
УДК 621.181.7:662.9

Л.Э.Вальдма, А.Н.Тюманок, Ю.Ю.Пирсо,  
В.А.Кудрявцев, М.Х. Нанитс

### О ГЕОМЕТРИИ ВХОДНЫХ КАНАЛОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛИТЕЛЯ

Распылители как органы смесеобразования должны обеспечивать высокую тонкость распыливания и стабильную производительность (расход).

В настоящее время распыливающие элементы форсунок в СССР и за рубежом изготавливают обычно из конструкционных и инструментальных сталей методами механической обработки [1], [2]. Имеются также данные о распылителях, изготовленных методом листовой штамповки [3]. Входные каналы распылителей как у первого, так и у второго типа, выполнены прямыми, постоянного сечения, являются наиболее технологичными. Недостатком таких распылителей является наличие резких переходов в начале каналов. Резкие переходы представляют из себя гидравлические сопротивления, они обуславливают возникновение зон задержки потоков жидкости и образование вихрей, которые вызывают кавитационные повреждения (см. фиг. 1 и 2). Направление кавитационных полос примерно  $24^{\circ}$ . В результате такого дросселирования жидкости уменьшается скорость потока в канале, ухудшается охлаждение стенок канала и на них часто происходит коксование топлива. Топливо с пониженной скоростью и кинетической энергией, в свою очередь, меньше способно очищать каналы от частиц кокса. Кроме того, в зонах закоксования тормозятся твердые частицы, имеющиеся в жидком топливе, что в конечном итоге приводит к заносу (забиванию)



Фиг. 1.  
Зоны задержки потока жидкости  
1 и 2 (светлые полосы).



Фиг. 2. Кавитационные повреждения на входном канале  
(см. фиг. 1 светлые полосы) 1200 х.



Фиг. 3.  
Занесенные каналы 1 и 2  
завихрителя.

входных каналов (см. фиг. 3) и выходу форсунки из строя. На кавитационные явления как инициаторы закоксования распылителей форсунок указывают и другие авторы [4].

Целью настоящей работы было изучение возможности улучшения формы канала, устраняющего или уменьшающего образование зон задержки потока жидкости и тем самым уменьшающего закоксование поверхностей входных каналов и забивание распылителя. Опыты, проводимые на прозрачных моделях и при эксплуатации на Литовской и Конаковской ГРЭС показали, что опасность заноса входных каналов можно сильно уменьшить, выполняя входные каналы сужающимися (см. фиг. 4). Конструкция входного канала выбирается на основании нижеследующего расчета.

На основании теоремы о сохранении момента количества движения для идеальной несжимаемой жидкости имеем:

$$r u = r_0 u_0, \quad (I)$$

где  $r$  - расстояние от оси камеры до частицы жидкости,

$u = r \frac{d\varphi}{dt}$  - тангенциальная составляющая скорости частицы (окружная скорость),

$r_0$  - радиус камеры завихрения,

$u_0$  - скорость частицы жидкости на радиусе  $r_0$ .

В случае наличия притока и истока из условия неразрывности на цилиндрической поверхности радиуса  $r$  и высоты  $h_0$  имеем:

$$Q = 2\pi h_0 r v, \quad (2)$$

где  $Q$  - объемный расход,

$h_0$  - глубина камеры,

$v$  - радиальная составляющая скорости частицы.

Равенством (2) можно выразить радиальную скорость

$$v = \frac{Q}{2\pi h_0 r}. \quad (3)$$

Закон движения частицы в радиальном направлении получается решением дифференциального уравнения:

$$\frac{dr}{dt} = - \frac{Q}{2\pi h_0 r}. \quad (4)$$

Решение этого уравнения в случае камеры постоянной глубины выразится:

$$r^2 = r_0^2 - \frac{Q}{\pi h_0} t. \quad (5)$$

Окружную скорость получим из (I)

$$u = \frac{r_0 u_0}{\sqrt{r_0^2 - \frac{Q}{\pi h_0} t}}. \quad (6)$$

Закон движения частицы в окружном направлении получается интегрированием дифференциального уравнения:

$$d\varphi = \frac{r_0 u_0}{r_0^2 - \frac{Q}{\pi h_0} t} dt,$$

где  $\varphi$  - центральный угол поворота жидкости.

Тогда, учитывая начальные условия ( $\varphi = 0$ ), получим:

$$\varphi = \frac{\pi r_0 u_0 h_0}{Q} \ln \frac{r_0^2}{r_0^2 - \frac{Q}{\pi h_0} t}. \quad (7)$$

Исключая из уравнений (5) и (7) время, получим траекторию частицы в полярных координатах

$$\varphi = \frac{2\pi r_0 u_0 h_0}{Q} \ln \frac{r_0}{r}. \quad (8)$$

Угол наклона каждой частицы в любой точке траектории к окружности выражается:

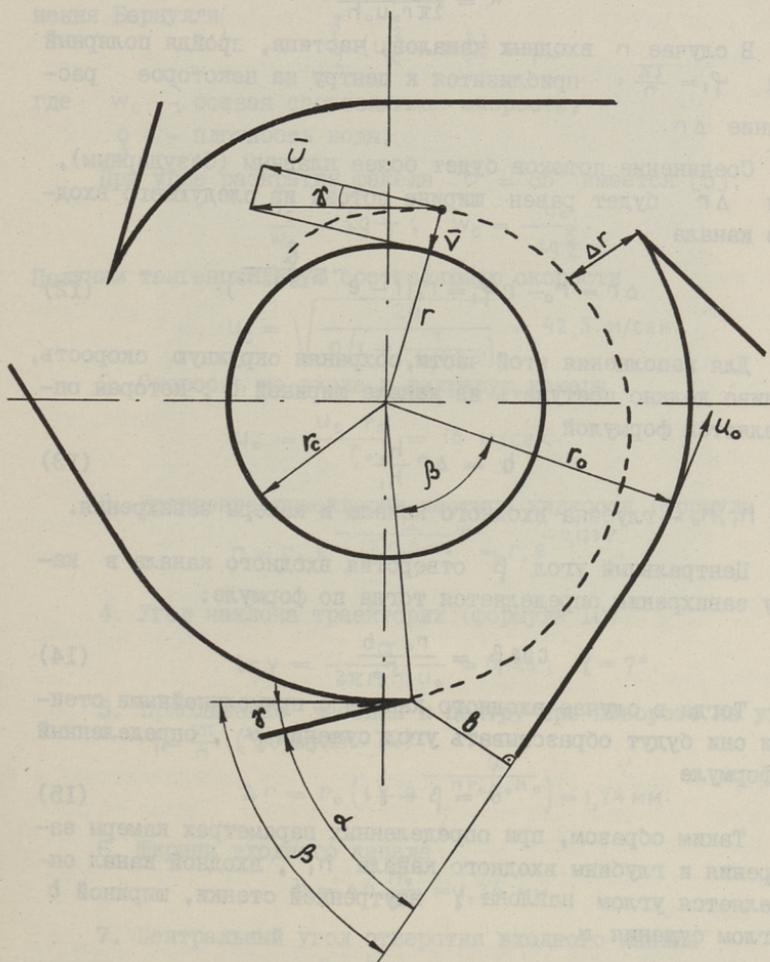
$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{dr}{r d\varphi}, \quad (9)$$

и, находя производную из выражения (8), получим

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{Q}{2\pi r_0 u_0 h_0}. \quad (10)$$

Оказывается, что угол наклона не зависит от радиуса и, таким образом, точки двигаются по логарифмической спирали. Эта природа движения может быть основной для рационального образования входного канала. Входной канал должен быть образован таким образом, чтобы траектория движения частицы была продолжением внутренней стенки, т.е. внутренняя стенка описывает логарифмическую спираль.

Для уменьшения гидравлических сопротивлений наружную стенку выполняют как касательную к камере закрутки. Точка из



Фиг. 4. Камера завихрения с сужающимися входными каналами.

которой внутренняя стенка проводится, (фиг. 4) определяется по следующим соображениям.

Зависимость радиуса расположения частицы от полярного угла, пройденного частицей от точки входа в камеру закручивания, определяется из формулы (8)

$$r = r_0 e^{-k\varphi}, \quad (II)$$

где

$$k = \frac{Q}{2\pi r_0 u_0 h_0}.$$

В случае  $n$  входных каналов, частица, пройдя полярный угол  $\varphi_1 = \frac{2\pi}{n}$ , приблизится к центру на некоторое расстояние  $\Delta r$ .

Соединение потоков будет более плавным (безударным), если  $\Delta r$  будет равен ширине потока из следующего входного канала

$$\Delta r = r_0 - r\varphi_1 = r_0 \left(1 - e^{-\frac{Q}{n r_0 u_0 h_0}}\right). \quad (I2)$$

Для заполнения этой части, сохраняя окружную скорость, топливо должно поступать из канала шириной  $b$ , которая определяется формулой

$$b = \Delta r \frac{h_0}{h_1}, \quad (I3)$$

где  $h_1, h_0$  - глубина входного канала и камеры завихрения.

Центральный угол  $\beta$  отверстия входного канала в камере завихрения определяется тогда по формуле:

$$\cos \beta = \frac{r_0 - b}{r_0}. \quad (I4)$$

Тогда в случае входного канала с прямолинейными стенками они будут образывать угол сужения  $\alpha$ , определенный по формуле

$$\alpha = \beta - \gamma. \quad (I5)$$

Таким образом, при определенных параметрах камеры завихрения и глубины входного канала  $h_1$ , входной канал определяется углом наклона  $\gamma$  внутренней стенки, шириной  $b$  и углом сужения  $\alpha$ .

**Пример:** Определяем геометрию сужающегося входного канала завихрителя распылителя ОН-547-03 для идеальной жид-

кости, распределитель которого показан на фиг. 1. Данные: расход  $Q = 800$  кг/час ( $0,222$  кг/сек) по воде, давление  $p = 20$  ат ( $2$  Мн/м<sup>2</sup>), радиус камеры закрутки  $r_0 = 6$  мм, радиус сопла  $r_c = 2,25$  мм, глубина камеры закрутки  $h_0 = 3$  мм, глубина входного канала  $h_1 = 3$  мм, число входных каналов  $n = 3$ , угол раскрытия факела  $\delta = 85^\circ$ .

1. Скорость жидкости на радиусе сопла получим из уравнения Бернулли

$$\frac{\rho}{2} (u_c^2 + w_c^2) = p,$$

где  $w_c$  - осевая составляющая скорости,

$\rho$  - плотность воды.

При угле раскрытия факела  $\delta = 85^\circ$  имеется [5]:

$$\frac{u_c}{w_c} = \operatorname{tg} \frac{\delta}{2}; \quad w_c = \frac{u_c}{\operatorname{tg} \frac{\delta}{2}}.$$

Получим тангенциальную составляющую скорости

$$u_c = \sqrt{\frac{2p}{\rho \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \frac{\delta}{2}}\right)}} = 42,5 \text{ м/сек.}$$

2. Скорость на входе в вихревую камеру

$$u_0 = \frac{u_c r_c}{r_0} = 16 \text{ м/сек.}$$

3. Уравнение траектории частицы жидкости (формула II)

$$r = r_0 e^{-\frac{Q}{2\pi r_0 h_0 u_0} \varphi} = r_0 e^{-0,123 \varphi}.$$

4. Угол наклона траектории (формула IO)

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{Q}{2\pi r_0 h_0 u_0} = 0,123; \quad \gamma = 7^\circ.$$

5. Приближение частицы к центру при повороте на угол

$\varphi_1 = \frac{2\pi}{n}$  (формула I2)

$$\Delta r = r_0 \left(1 - e^{-\frac{Q}{n r_0 u_0 h_0}}\right) = 1,24 \text{ мм.}$$

6. Ширина входного канала

$$b = \Delta r \frac{h_0}{h_1} = 1,24 \text{ мм.}$$

7. Центральный угол отверстия входного канала

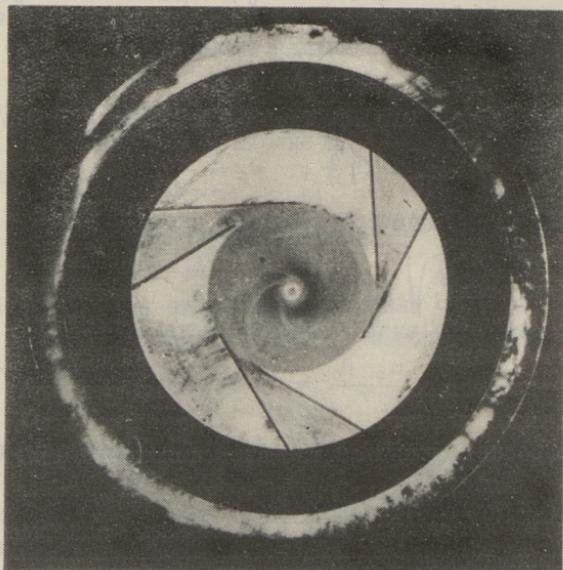
$$\cos \beta = \frac{r_0 - b}{r_0} = 0,79; \quad \beta = 37^\circ 48'.$$

8. Угол сужения входного канала

$$\alpha = \beta - \gamma = 30^\circ 48'.$$

## Экспериментальная проверка сужающегося канала

Для проверки вышеизложенных формул были проведены испытания с моделью, изготовленной с геометрическими размерами, соответствующими расчетному примеру. На фиг. 5 показана модель с входными каналами шириной  $I,24$  мм и углом сужения  $30^{\circ}48'$ .



Фиг. 5. Сужающийся входной канал после испытания в эксплуатации.

На фиг. 5 видно, что поток течет по всему сечению канала и не имеет зон задержки со следами кавитации. Следовательно, математическая модель течения идеальной жидкости в распылителе с сужающимися каналами близка к фактическому движению топлива.

Вышеописанная геометрия входных каналов была принята основой для конструирования металлокерамических распылителей. Угол сужения входных каналов и ширина выхода в камеру были скорректированы экспериментально в соответствии с требуемым расходом жидкости.

## В ы в о д н ы

1. Математическая модель и опыты показали, что центробежные распылители с сужающимися входными каналами имеют ряд преимуществ, по сравнению с каналами постоянного сечения, например, каналы имеют пониженное гидравлическое сопротивление, что уменьшает образование кавитационных явлений, коксообразования и забивания входных каналов.

2. Технологически сужающиеся каналы целесообразно выполнять прессованием (методом порошковой металлургии, объемной или листовой штамповкой).

## Л и т е р а т у р а

1. ОСТ.24.03.009. Форсунки стационарных паровых котлов. Мин. тяжелого и транспортного машиностроения. М., 1970.

2. А.И. Карабин, Е.С. Раменская, И.К. Энно. Сжижение жидкого топлива в промышленных установках. Изд. "Металлургия", 1966.

3. Л.М. Цирульников, Л.Б. Королева, А.П. Рыбаков, Ю.В. Стужин, О.А. Тасс. Штампованные центробежные форсунки для распыливания мазута. Журн. "Электрические станции", № 1, 1971.

4. С.П. Козырев. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. Изд. "Машиностроение" М., 1971.

5. Г.М. Абрамович. Прикладная газовая динамика. Гостехиздат, М., 1951.

L. Valdma, A. Tümanok, J. Pirso,  
V. Kudrjajtsev, M. Nanits

Über die Geometrie der Einlaßkanäle  
=====

der Drallzerstäuber  
=====

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden die Mängel der Einlaßkanäle des Drallzerstäubers mit geraden konstanten Querschnittsflächen betrachtet. Die erhaltenen Ergebnisse beweisen die Zweckmäßigkeit der sich verjüngenden Einlaßkanäle. Es werden das mathematische Modell und die Berechnungsmethodik der sich verjüngenden Einlaßkanäle des Drallzerstäubers für eine Idealflüssigkeit dargelegt.

---

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА. Сборник статей XIV. Редактор В. Ратник. Технический редактор Е. Ракеева. Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 28/IX 1973. Подписано к печати 29/XI 1973. Бумага 60x90/16. Печ. л. 2,0+0,125 приложение. Уч.-изд. л. 1,68. Тираж 350. МВ-10505. Зак. №632. Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коскла, 2/9. Цена 17 коп.

Т Е П Л О Э Н Е Р Г Е Т И К А

СБОРНИК ТРУДОВ

XIV

УДК 620.193.46

О коррозионной активности отдельных компонентов натрубных отложений, образующихся в котлах-утилизаторах медеплавильных заводов. К.И.Ингерманн, Х.Х. Арро, А.А. Отс. Труды Таллинского политехнического института, 1973, № 352, стр. 3-14.

Рассматривается механизм коррозии котельных сталей в присутствии натрубных отложений с поверхностей нагрева котлов-утилизаторов, установленных за медеплавильными отражательными печами. Приводятся результаты химического и рентгенофазового анализа проб отложений, использованных для лабораторных испытаний различных марок стали. Установлено, что коррозионно-активными компонентами натрубных отложений являются сульфаты меди, свинца и железа, а также окись свинца.

Фигур 3, Таблиц 2, библиографий 8.

УДК 662.612

Исследование горения частиц кокса горючего сланца. Д.М.Егоров. Труды Таллинского политехнического института, 1863, № 352, стр. 15-21.

В статье рассматриваются результаты исследования горения коксовых частиц горючего сланца. В настоящей работе

также приводится сравнение опытных данных с расчетами времени выгорания сланцевого кокса.

Фигур 2, библиографий 7.

УДК 621.181.7:662.9

О геометрии входных каналов центробежного распылителя. Л.Э. Вальдма, А.Н. Тюманок, Ю.Ю. Пирсо, В.А. Кудрявцев, М.Х. Нанитс. Труды Таллинского политехнического института, 1973, № 352 стр. 23-32.

Объясняется целесообразность применения центробежных распылителей с сужающимися входными каналами. Приводятся теория и расчет сужающего входного канала.

Фигур 5, библиографий 5.



Цена 17 коп.