

## БАЛАНСОВЫЕ ОПЫТЫ ПО ОЧИСТКЕ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ТЭЦ ОТ SO<sub>2</sub> И NO<sub>x</sub> КАРБОНАТНЫМ РАСПЛАВОМ

Досмухамедов Н.К.,<sup>1</sup> Жолдасбай Е.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Алматы, Казахстан.

**Аннотация.** Концептуальная схема технологии очистки отходящих газов ТЭЦ включает организацию взаимосвязанных между собой процессов химической абсорбции SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> карбонатным расплавом щелочных металлов и дальнейшую регенерацию карбонатно-сульфатного расплава природным газом. В ранее проведенных исследованиях была показана возможность очистки отходящих газов от серы и регенерации расплава монооксидом углерода. Ограниченность этих работ заключалась в использовании в качестве восстановителя при регенерации расплава СО, и в практическом отсутствии данных по поведению соединений азота. Эти пробелы устранены в настоящей работе.

На основании результатов балансовых опытов процесса химической абсорбции SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> из отходящих газов карбонатным расплавом, и регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом, показана принципиальная возможность осуществления замкнутой технологии глубокой очистки газов от SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>. Показано, что ведение процесса химической абсорбции газов карбонатным расплавом и регенерации расплава природным газом при одинаковой температуре 500 °С позволяет осуществить технологию с использованием одного реактора.

Установлено, что в процессе химической абсорбции SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> из отходящих газов ТЭЦ карбонатным расплавом щелочных металлов, улавливается более 95 % серы и ~60 % соединений азота. Показано, что в процессе регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом достигается 100 % извлечение серы и азота в газовую фазу с образованием в расплаве карбонатов щелочных металлов. Приведены результаты материального баланса процесса химической абсорбции и регенерации карбонатно-сульфатного расплава путем восстановления природным газом.

**Ключевые слова:** отходящие газы, сернистый ангидрид, соединения азота, химическая абсорбция, карбонатный расплав, регенерация, природный газ.

### Введение

Выбросы промышленных предприятий Казахстана в атмосферу составляют более трех миллионов тонн в год, из которых 85% приходится на 43 крупных предприятия. Наибольшее количество вредных веществ от стационарных источников выбрасывают предприятия цветной металлургии (29 %) и теплоэнергетики (23 %) в виде сернистого ангидрида [1, 2].

На большинстве ТЭЦ очистка относительно бедных по сере отходящих газов угольных электростанций, содержащих менее 4 % SO<sub>2</sub>, осуществляется способами их нейтрализации путем взаимодействия потока отходящего газа с известняком - CaCO<sub>3</sub> или гашеной известью - Ca(OH)<sub>2</sub>, которые могут применяться либо в твердом виде, либо в виде водной суспензии.

В условиях жестких требований, предъявляемых к охране окружающей среды, эколо-

### Источник финансирования исследований

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2020-2022 годы по приоритетному направлению «Рациональное использование природных ресурсов, в том числе водных ресурсов, геологии, переработки, новых материалов и технологий, безопасных изделий и конструкций» проекта № AP08856384 ««Разработка новой высокотехнологичной технологии утилизации SO<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> из отходящих газов ТЭЦ и металлургических предприятий с получением товарных продуктов»».

гии и жизнеобеспечению людей, существующие сегодня методы очистки газов, не удовлетворяют современным требованиям и сопровождаются образованием большого объема отвального загрязненного гипса [3, 4, 5]. Извлечение серы из газов ~90 %, практически весь спектр соединений азота выбрасывается в атмосферу, что требует изыскания новых способов очистки газов не только от  $\text{SO}_2$ , но и  $\text{NO}_x$ .

В работах [6, 7] предложено высокоэффективное решение глубокой очистки отходящих от  $\text{SO}_2$  ( $\text{SO}_2 < 0,003\%$ ) путем абсорбции  $\text{SO}_2$  расплавом карбонатов щелочных металлов. Был построен опытный завод, но процесс не был внедрен из-за отсутствия надежного способа регенерации карбонатного расплава.

Одним из эффективных решений регенерации карбонатно-сульфатного расплава является его восстановление монооксидом углерода [8]. Достигнуто высокое до 99 % извлечение серы из расплава. Технология была апробирована на котельной К-19 АО «ЭнергоОрталык-3» (г. Шымкент) [9]. Полученные результаты полностью подтвердили теоретические основы технологии: достигнуто высокое до 95 % улавливание серы и практически полное извлечение ее при регенерации монооксидом углерода. К сожалению, несмотря на положительные результаты открытыми остались вопросы улавливания соединений азота в условиях процесса химической абсорбции газов карбонатным расплавом и дальнейшей регенерации карбонатно-сульфатных расплавов монооксидом углерода.

Широкое использование в металлургической практике природного газа представляет большой интерес с точки зрения его применения в качестве восстановителя карбонатно-сульфатного расплава, вместо монооксида углерода. Теоретические аспекты регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом были рассмотрены в работе [10, 11]. Показана принципиальная возможность использования природного газа в качестве восстановителя карбонатно-сульфатного расплава с получением сероводоро-

да ( $\text{H}_2\text{S}$ ), пригодного для получения серной кислоты и элементарной серы [11]. Применение природного газа вместо  $\text{CO}$  для регенерации имеет значительные преимущества: исключается необходимость дополнительного оборудования и расхода угля для получения  $\text{CO}$ . В проведенных исследованиях, к сожалению, не были затронуты вопросы улавливания соединений азота  $\text{NO}_x$  в процессах химической абсорбции отходящих газов и регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом.

Детальный анализ поведения соединений азота в условиях процесса химической абсорбции отходящих газов ТЭЦ карбонатным расплавом щелочных металлов и дальнейшей регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом проведен в работе [12]. На основании термодинамического анализа реакций взаимодействия компонентов газовой фазы с карбонатным расплавом щелочных металлов показана высокая вероятность улавливания соединений азота ( $\text{NO}_x$ ) с образованием в расплаве, преимущественно, нитрита калия ( $\text{KNO}_2$ ). Также установлено, что при температуре процесса регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом (823 К) свободная энергия Гиббса реакции восстановления  $\text{KNO}_2$  природным газом составляет,  $\Delta G_{823\text{K}}^\circ = -520$  кДж/моль. Большая отрицательная величина свободной энергии Гиббса указывает на возможность восстановления  $\text{KNO}_2$  с образованием карбоната калия, чистого азота и паров воды [12].

Цель настоящей работы – исследование улавливания  $\text{SO}_2$  и соединений азота  $\text{NO}_x$  в процессе химической абсорбции отходящих газов карбонатным расплавом щелочных металлов и регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом в условиях балансовых опытов.

#### Методы исследования

Балансовые опыты химической абсорбции  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$  карбонатным расплавом, с дальнейшей регенерацией карбонатно-сульфатного расплава природным газом проведены в непрерывном режиме.

Количество эвтектического карбонатного расплава – 271,26 кг.

Состав газов, подаваемых в реактор, был следующим, % (об.): 0,15 SO<sub>2</sub>, 4,7 O<sub>2</sub>, 9,3 CO<sub>2</sub>, 3,8 H<sub>2</sub>O, 13 ppm – NO, 52 ppm – NO<sub>2</sub>, остальное – азот.

Расход газа составлял 12,87 м<sup>3</sup>/мин и измерялся расходомером СГК-Г4. Контроль состава отходящих газов из реактора проводился с помощью газоанализатора ДАГ-510 с диапазоном измерений 0-400 ppm, и абсолютной погрешностью ± 5 ppm.

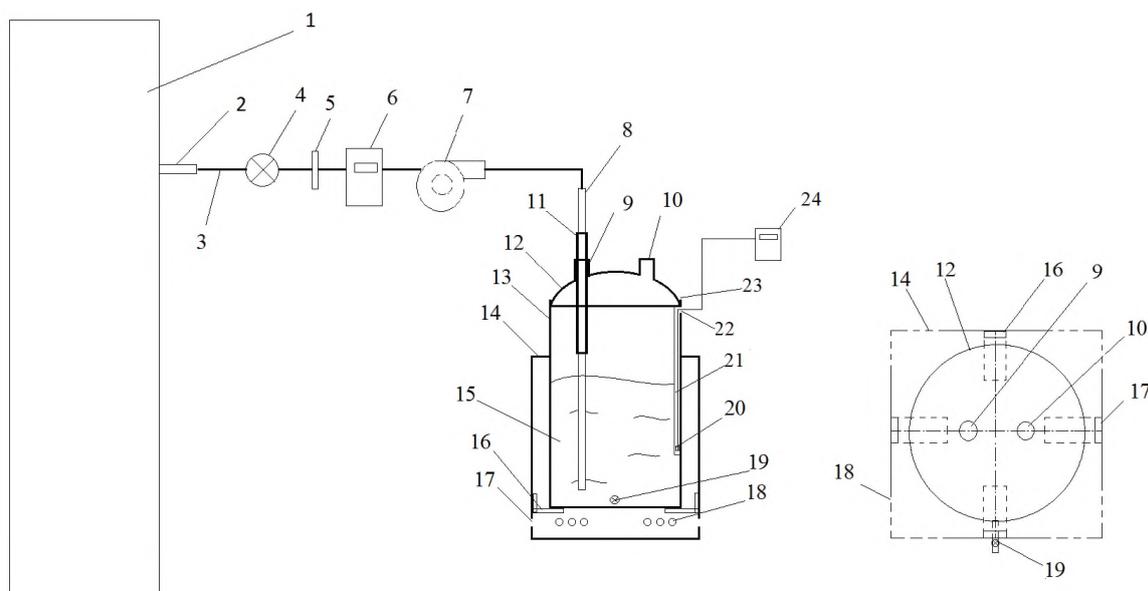
Продолжительность процесса химической абсорбции очистки газов от SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> составила 600 мин. Во время опытов, через каждые 60 мин отбирали пробы расплава в количестве ~10 г с помощью стержня из нержавеющей стали. Пробы после измельчения подвергали

химическому анализу на содержание в них серы и азота.

После завершения процесса химической абсорбции, полученный карбонатно-сульфатный расплав подвергался регенерации путем продувки природным газом. Температура процесса регенерации расплава – 500 °С. Температуру расплава контролировали с помощью термопары ТХА и вторичным прибором КСП-4.

#### Результаты и общее их обсуждение

Общая схема установки для проведения балансовых опытов по химической абсорбции SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> из отходящих газов ТЭЦ карбонатным расплавом и дальнейшей регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом показана на рисунке 1.



- 1 – газопровод; 2 – врезка для отбора отходящих газов (труба d=25 мм); 3 – вакуумный шланг (d=25 мм); 4 – кран; 5 – фильтр (марлевый); 6 – газовый счетчик (СГК G-4); 7 – дымосос (Vотх.газ=2600 м<sup>3</sup>/с); 8 – труба для ввода газа в реактор (d=25 мм); 9 – отверстие для направляющей трубы (d=35 мм); 10 – выход для отходящих газов (d=25 мм); 11 – направляющая труба (d=35 мм); 12 – съемная крышка; 13 – реактор (нержавеющая сталь); 14 – кожух (стальной); 15 – карбонатный расплав; 16 – уголок; 17 – отверстие для горелки; 18 – отверстия для воздуха; 19 – кран для аварийного выпуска расплава; 20 – термопара ТХА; 21 – кожух для термопары (d=10 мм); 22 – отверстие для термопары; 23 – болты крепления крышки; 24 – вторичный прибор КСП-4.

Рисунок 1 – Технологическая схема очистки отходящих газов от SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>

**Процесс химической абсорбции  $SO_2$  и  $NO_x$  карбонатным расплавом**

Общая продолжительность процесса химической абсорбции – 10 ч. Состав эвтектической карбонатной смеси, %: 43,5  $Li_2CO_3$ , 31,5  $Na_2CO_3$ , 25,0  $K_2CO_3$ .

Расход газа, подаваемого на абсорбцию,

составил 12,87  $m^3/мин$ . Общий объем газа, пропущенного через карбонатный расплав в течение 10 ч, составил 7721  $m^3$  или 10468,5 кг.

Результаты опытов по очистке отходящих газов от  $SO_2$  и  $NO_x$  путем химической их абсорбции карбонатным расплавом щелочных металлов приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Результаты химической абсорбции  $SO_2$  и  $NO_x$  карбонатным расплавом**

№№ пп	Время, мин	Количество пропущенного через расплав газа, $m^3$	Количество $SO_2$ в исходном газе, кг	Количество серы в расплаве, кг	Количество $NO_x$ в расплаве, кг
1	60	772,07	3,14	1,49	0,08
2	120	1544,13	6,28	2,99	0,17
3	180	2316,20	9,42	4,49	0,25
4	240	3088,27	12,56	5,99	0,33
5	300	3860,33	15,70	7,49	0,42
6	360	4632,40	18,84	8,99	0,50
7	420	5404,47	21,98	10,49	0,58
8	480	6176,53	25,12	11,98	0,67
9	540	6948,60	28,26	13,50	0,75
10	600	7720,67	31,41	15,01	0,84

Из таблицы 1 видно, что с увеличением продолжительности процесса химической регенерации, содержание серы и азота ( $NO_x$ ) в расплаве увеличивается. При этом извлечение серы из газов в расплав практически достигает максимального извлечения. В случае извлечения азота результаты по его количеству значительно отклоняется от максимального значения его извлечения. В результате расчетов установлено, что извлечение серы и азота в карбонатный расплав составляют 96 и 60 %, соответственно. Низкое извлечение азота в расплав можно объяснить некоторым торможением протекания реакции взаимодействия карбоната калия с соединениями азота, ввиду нехватки свободного кислорода для более полного связывания соединений азота ( $NO_x$ ) в нитрит калия. Следовательно, в процессе хи-

мической абсорбции серы и соединений азота из отходящих газов карбонатным расплавом необходимо увеличивать время пребывания газа в реакторе. Это позволит обеспечить более полный контакт газа с расплавом и предусмотреть возможность контроля подачи кислорода во время процесса.

Установленные закономерности свидетельствуют о том, что в процессе химической абсорбции газов наблюдается значительный рост в расплаве общего содержания ионов сульфата  $SO_4^{2-}$  и нитрита  $NO_2^-$ . При этом содержание ионов карбоната ( $CO_3^{2-}$ ) в расплаве снижается. График зависимости расчетных значений содержания ионов  $SO_4^{2-}$  и  $NO_2^-$  в расплаве от продолжительности процесса химической абсорбции газов, показанный на рисунке 2, полностью подтверждает это положение.

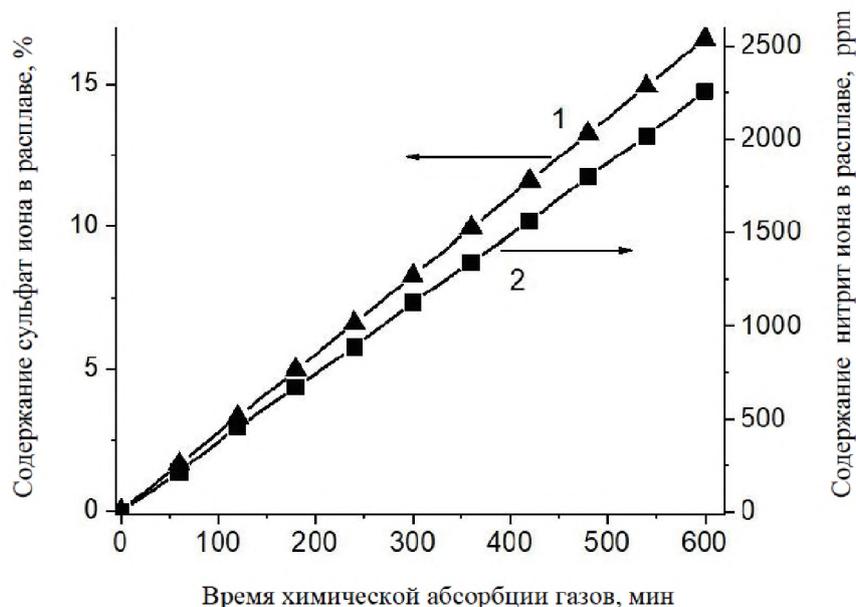


Рисунок 2 – Динамика изменения содержания ионов  $SO_4^{2-}$  и  $NO_2^{1-}$  в расплаве от продолжительности процесса химической абсорбции отходящих газов карбонатным расплавом

Конечный расчетный состав и количество отходящего газа, полученного после его очистки от  $SO_2$  и  $NO_x$  карбонатным расплавом, показан в таблице 2.

Таблица 2 – Количество и состав отходящих газов после процесса химической абсорбции карбонатным расплавом щелочных металлов

Компоненты газа	Кол-во, кг	Объем газов, $лм^3$	%, (об.)
$SO_2$	1,38	0,53	0,0132
$NO_2$	0,42	0,28	0,005
$O_2$	523,42	366,03	5,0
$N_2$	7932,46	6339,07	75,75
$CO_2$	1435,05	724,77	13,73
$H_2O$	575,77	289,33	5,5
<b>Всего:</b>	<b>10468,5</b>	<b>7720,01</b>	<b>100,00</b>

По результатам проведенных балансовых опытов рассчитан общий материальный баланс технологии очистки отходящих газов ТЭС от  $SO_2$  и  $NO_x$  карбонатным расплавом щелочных металлов, который представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Общий материальный баланс процесса химической абсорбции газов карбонатным расплавом щелочных металлов

№	Наименование продуктов	Количество, кг	Сера			Азот		
			I	II	III	I	II	III
<b>Загружено:</b>								
1	Отходящие газы	10468,5	0,15	15,70	100	0,005	0,27	100

2	Карбонатный расплав	271,26						
<b>Итого:</b>		<b>10739,76</b>		<b>15,70</b>	<b>100</b>		<b>0,27</b>	<b>100</b>
<b>Получено:</b>								
3	Карбонатно-сульфатный расплав	288,31	5,21	15,02	95,67	0,048	0,14	51,39
4	Газы после очистки	10451,45	0,005	0,68	4,33	0,001	0,13	48,61
<b>Итого:</b>		<b>10739,76</b>		<b>15,70</b>	<b>100</b>		<b>0,27</b>	<b>100</b>

I – содержание, %; II – количество, кг; III – распределение, %.

**Процесс регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом**

За основу проведения химической регенерации карбонатно-сульфатного расплава путем восстановления природным газом принята установка, схема которой показана на рис. 1. Методика проведения балансовых опытов по регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом заключалась в следующем. Продувочная трубка (8), использованная для подачи отходящих газов в реактор (13), с помощью вакуумного шланга соединялась через газовый счетчик СГК-G4 (6) с баллоном природным газом. Далее продувочная трубка опускалась в расплав на расстояние 10 мм от дна реактора, после чего начиналась продувка карбонатно-сульфатного расплава.

Продолжительность этапа регенерации – 40 мин. Пробы расплава в количестве по 10 г отбирались с помощью стального стержня через каждые 10 мин. Расход  $CH_4$  и кислорода, подаваемых для регенерации, составлял 0,29  $m^3/мин$  и 0,4  $m^3/мин$ , соответственно.

По истечении заданного времени продувки расплава природным газом, его подача в реактор прекращалась. Продувочная трубка вынималась из расплава и готовилась к проведению дальнейшей операции химической абсорбции свежей порции серосодержащих отходящих газов. Таким образом, технология глубокой очистки отходящих газов от  $SO_2$  и  $NO_x$  работала в непрерывном режиме.

Результаты испытаний регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом представлены в таблице 4.

**Таблица 4 – Результаты процесса химической регенерации карбонатно-сульфатного расплава путем восстановления  $CH_4$**

№№ пп	Время, мин	Кол-во $CH_4$ , пропущенного через расплав, $m^3$	Кол-во серы в расплаве, кг	Кол-во $NO_x$ в расплаве, кг
1	0	0	15,01	0,84
2	10	2,84	8,56	0,61
3	20	5,69	4,89	0,35
4	30	8,53	1,47	0,08
5	40	11,37	Следы	Следы

Из данных, приведенных в табл.4 видно, что содержание серы и азота ( $NO_x$ ) с увеличением времени продувки расплава природным газом уменьшается. Это означает, что реакция регенерации нитрита калия описывается ре-

акцией первого порядка, и механизм процесса описывается протеканием реакций восстановления сульфата и нитрита калия природным газом в присутствии кислорода.

Общий материальный баланс процесса хи-

мической регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом показан в таблице 5.

**Выводы:**

1. Полученные положительные результа-

Таблица 5 – Общий материальный баланс процесса регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом

№	Наименование продуктов	Количество, кг	Сера			Азот		
			I	II	III	I	II	III
<b>Загружено:</b>								
1	Карбонатно-сульфатный расплав	288,31	5,21	15,02	100,0	0,048	0,14	100
2	Природный газ	7,81						
<b>Итого:</b>		<b>296,12</b>		<b>15,02</b>	<b>100</b>		<b>0,14</b>	<b>100</b>
<b>Получено:</b>								
3	Карбонатный расплав	271,26	-	-	-	-	-	-
4	Отходящие газы	24,86	60,41	15,02	100	0,56	0,14	100
<b>Итого:</b>		<b>296,12</b>		<b>15,02</b>	<b>100</b>		<b>0,14</b>	<b>100</b>

На основании полученных результатов рассчитано извлечение серы и азота из расплава при химической регенерации карбонатно-сульфатного расплава путем восстановления природным газом. Установлено, что при химической регенерации карбонатно-сульфатного расплава достигается практически 100 % извлечение серы и соединений азота в газовую фазу. Установленные закономерности полностью подтверждают выводы термодинамического анализа о высокой вероятности абсорбции SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> карбонатным расплавом, и возможности восстановления сульфатов щелочных металлов и нитрита калия природным газом [12].

Полученные результаты показывают высокую эффективность очистки отходящих газов от серы и соединений азота, и открывают широкие возможности для использования разработанной технологии для очистки дымовых газов ТЭЦ, работающих на сжигании угля.

ты балансовых опытов процесса химической абсорбции отходящих газов карбонатным расплавом, и регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом показывают принципиальную возможность осуществления технологии глубокой очистки отходящих газов ТЭЦ от SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> в одном реакторе.

2. Установлено, что в процессе химической абсорбции SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> из отходящих газов ТЭЦ карбонатным расплавом щелочных металлов, улавливается более 95 % серы и ~60 % соединений азота. Показано, что в процессе регенерации карбонатно-сульфатного расплава природным газом достигается 100 % извлечение серы и азота в газовую фазу с образованием в расплаве карбонатов щелочных металлов.

3. Приведены результаты материального баланса процесса химической абсорбции и регенерации карбонатно-сульфатного расплава путем восстановления природным газом.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Программа по наращиванию потенциала для регионального сотрудничества по приоритету Регионального плана действий по охране окружающей среды «Качество воздуха» в рамках проекта КАПАКТ. Ташкент. 2012. с.31.
- 2 «Программа по развитию электроэнергетики РК на 2010-2014 гг.». Постановление Правительства Республики Казахстан № 302 от 14 апреля 2010 г.
- 3 Губонина, З.И., Крынкина В.Н., Кунин В.С. Промышленная экология. Защита атмосферного воздуха от вредных выбросов: учеб. пособие / - М. : Изд-во МГОУ, 2012. 138 с.
- 4 Калыгин В. Г. Промышленная экология: учебное пособие для вузов. - М.: Академия, 2010. 432 с.
- 5 Пикалов, Е. С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Механические и физические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: Учебное пособие. - Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. 78 с.
- 6 Nolan P. Flue Gas Desulfurization Technologies for Coal-Fired Power Plants. *Coal-Tech 2000 International Conference*. Indonesia, Jakarta. 2000.
- 7 Krebs T. and Nathanson G.M. Reactive collisions of sulfur dioxide with molten carbonates. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2010. 107(15). P.6622–6627.
- 8 Kaplan V., Wachtel E., Lubomirsky I. Carbonate melt regeneration for efficient capture of SO<sub>2</sub> from coal combustion. *The Royal Society of Chemistry (RSC) Advances* 3, 2013. P. 15842-15849.
- 9 Досмухамедов Н.К., Симбинов М.Д., Жолдасбай Е.Е., Каплан В.А. Опытные промышленные испытания технологии глубокой очистки отходящих газов ТЭС карбонатным расплавом щелочных металлов. *Горный Журнал Казахстана*. 2018. № 4. С.34-40.
- 10 Dosmukhamedov N., Kaplan V., Zholdasbay Y., Wachtel E., Lubomirsky I. Natural gas regeneration of carbonate melts following SO<sub>2</sub> capture from non-ferrous smelter emissions. *The Royal Society of Chemistry (RSC) Advances* 7, 2017, P. 21406-21411.
- 11 Kawase M. O. and Otaka M. Removal of H<sub>2</sub>S using molten carbonate at high temperature. *Waste Manag.* 2013. (33). P. 2706–2712.
- 12 Досмухамедов Н.К., Егизеков М.Г., Жолдасбай Е.Е., Курмансеитов М.Б., Аргын А.А. Поведение NO<sub>x</sub> при очистке отходящих газов ТЭС карбонатным расплавом щелочных металлов. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2021. № 1. С.30-35.

## REFERENCE

- 1 Programma po narashhivaniyu potenciala dlja regional'nogo sotrudnichestva po prioritetu Regional'nogo plana dejstvij po ohrane okruzhajushhej sredy «Kachestvo vozduha» v ramkah proekta KAPAKT. Tashkent. 2012. s.31.
- 2 «Programma po razvitiju jelektroenergetiki RK na 2010-2014 gg.». Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazahstan № 302 ot 14 aprelja 2010 g.
- 3 Gubonina, Z.I., Krynkina V.N., Kunin V.S. Promyshlennaja jekologija. Zashhita atmosfernogo vozduha ot vrednyh vybrosov: ucheb. posobie / - M. : Izd-vo MGOU, 2012. 138 s.
- 4 Kalygin V. G. Promyshlennaja jekologija: uchebnoe posobie dlja vuzov. - M.: Akademija, 2010. 432 s.
- 5 Pikalov, E. S. Processy i apparaty zashhity okruzhajushhej sredy. Mehanicheskie i fizicheskie metody ochistki promyshlennyh vybrosov v atmosferu i gidrosferu: Uchebnoe posobie. - Vladimir: Izd-vo VIGU, 2015. 78 s.
- 6 Nolan P. Flue Gas Desulfurization Technologies for Coal-Fired Power Plants. *Coal-Tech 2000 International Conference*. Indonesia, Jakarta. 2000.
- 7 Krebs T. and Nathanson G.M. Reactive collisions of sulfur dioxide with molten carbonates. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2010. 107(15). R.6622–6627.
- 8 Kaplan V., Wachtel E., Lubomirsky I. Carbonate melt regeneration for efficient capture of SO<sub>2</sub> from coal combustion. *The Royal Society of Chemistry (RSC) Advances* 3, 2013. R. 15842-15849.
- 9 Dosmuhamedov N.K., Simbinov M.D., Zholdasbay E.E., Kaplan V.A. Opytno-promyshlennye ispytaniya tehnologii glubokoj ochistki othodjashhij gazov TJeS karbonatnym rasplavom shhelochnyh metallov. *Gornyj Zhurnal Kazahstana*. 2018. № 4. S.34-40.
- 10 Dosmukhamedov N., Kaplan V., Zholdasbay Y., Wachtel E., Lubomirsky I. Natural gas regeneration of carbonate melts following SO<sub>2</sub> capture from non-ferrous smelter emissions. *The Royal Society of Chemistry (RSC) Advances* 7, 2017, R. 21406-21411.
- 11 Kawase M. O. and Otaka M. Removal of H<sub>2</sub>S using molten carbonate at high temperature. *Waste Manag.* 2013. (33). R. 2706–2712.
- 12 Dosmuhamedov N.K., Egizekov M.G., Zholdasbay E.E., Kurmanseitov M.B., Argyn A.A. Povedenie NO<sub>x</sub> pri ochistke othodjashhij gazov TJeS karbonatnym rasplavom shhelochnyh metallov. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*. 2021. № 1. S.30-35.

Досмұхамедов Н.К., Жолдасбай Е.Е.

### ЖЭС ШЫҒАТЫН ГАЗДАРДЫ $SO_2$ ЖӘНЕ $NO_x$ КАРБОНАТТЫ БАЛҚЫМАМЕН ТАЗARTУ БОЙЫНША БАЛАНСТЫҚ ТӘЖІРИБЕЛЕР

**Түйіндеме.** ЖЭС шығарылатын газдарды тазарту технологиясының тұжырымдамалық схемасы  $SO_2$  және  $NO_x$  сілтілі металдардың карбонатты балқымасымен химиялық абсорбциялау мен карбонатты-сульфатты балқыманы табиғи газбен регенерациялау процестерін ұйымдастыруды қамтиды. Бұрын жүргізілген зерттеулерде шығатын газдарды күкірттен тазарту және көміртегі тотығымен балқыманы қалпына келтіру мүмкіндігі көрсетілген. Бұл жұмыстар балқыманы регенерациялау кезінде тотықсыздандырғыш ретінде СО пайдалану және азот қосылыстарының әрекеті бойынша деректердің іс жүзінде болмауымен шектелді. Ол олқылықтардың орны осы жұмыста толтырылады.

Шығарылатын газдардан  $SO_2$  және  $NO_x$  карбонатты балқымамен химиялық абсорбциялау және карбонатты-сульфатты балқыманы табиғи газбен регенерациялау процесінің баланстық тәжірибелерінің нәтижелері негізінде  $SO_2$  және  $NO_x$  газдарды терең тазартудың жабық технологиясын жүзеге асырудың негізгі мүмкіндігі көрсетілген. Газдарды карбонатты балқымамен химиялық абсорбциялау және балқыманы табиғи газбен 500 °С бірдей температурада регенерациялау процесін жүргізу бір реакторды пайдалана отырып, технологияны жүзеге асыруға мүмкіндік беретіні көрсетілген.

ЖЭС шығатын газдарды  $SO_2$  және  $NO_x$  химиялық абсорбциялау процесінде сілтілі металдардың карбонатты балқымасымен 95%-дан астам күкірт және ~60% азот қосылыстары ұсталынады. Карбонатты-сульфатты балқыманы табиғи газбен қалпына келтіру процесінде газ фазасына күкірт пен азоттың 100% шығарылуына қол жеткізіліп, балқымада сілтілі металл карбонаттары пайда болатындығы көрсетілген.

Табиғи газбен қалпына келтіру арқылы карбонатты-сульфатты балқыманың химиялық абсорбциялау мен регенерациялау процесінің материалдық балансының нәтижелері келтірілген.

**Түйін сөздер:** шығатын газдар, күкіртті ангидрид, азот қосылыстары, химиялық абсорбция, карбонатты балқыма, регенерациялау, табиғи газ.

---

Dosmukhamedov N.K., Zholdasbay E.E.

### BALANCE EXPERIMENTS ON THE PURIFICATION OF WASTE GASES OF THERMAL POWER PLANTS FROM $SO_2$ AND $NO_x$ BY CARBONATE MELT

**Abstract.** The conceptual scheme of the waste gas treatment technology of the CHP includes the organization of interconnected processes of chemical absorption of  $SO_2$  and  $NO_x$  by the carbonate melt of alkali metals and further regeneration of the carbonate-sulfate melt by natural gas. In previous studies, it was shown that it is possible to purify waste gases from sulfur and regenerate the melt with carbon monoxide. The limitations of these works were the use of CO as a reducing agent during the regeneration of the melt, and the practical lack of data on the behavior of nitrogen compounds. These gaps are eliminated in this paper.

Based on the results of balance experiments of the process of chemical absorption of  $SO_2$  and  $NO_x$  from waste gases by a carbonate melt, and the regeneration of a carbonate-sulfate melt by natural gas, the principal possibility of implementing a closed technology for deep purification of gases from  $SO_2$  and  $NO_x$  is shown. It is shown that the process of chemical absorption of gases by a carbonate melt and the regeneration of the melt by natural gas at the same temperature of 500 °C allows the technology to be implemented using a single reactor.

It was found that during the chemical absorption of  $SO_2$  and  $NO_x$  from the waste gases of the CHP by the carbonate melt of alkali metals, more than 95 % of sulfur and ~60 % of nitrogen compounds are captured. It is shown that in the process of regeneration of a carbonate-sulfate melt with natural gas, 100% extraction of sulfur and nitrogen into the gas phase is achieved with the formation of alkali metal carbonates in the melt.

The results of the material balance of the process of chemical absorption and regeneration of the carbonate-sulfate melt by reduction with natural gas are presented.

**Keywords:** waste gases, sulfur dioxide, nitrogen compounds, chemical absorption, carbonate melt, regeneration, natural gas.

---

Сведения об авторах

Досмұхамедов Н.К.

Жолдасбай Е.Е.

7074128979 Ержан

E-mail: nurdos@bk.ru