

Технология, оборудование, САПР и экология литейного производства

Technological schema of furnace gases cleaning of ash and sulfur and nitric oxides, allowing to reach maximum degree of cleaning at minimum costs, is developed.

В. А. АРБУЗОВ, Б. Х. ИСАНОВА, М. О. БЕЛЯКОВА,
РГП «Карагандинский государственный индустриальный университет»,
А. Н. ЗАДИРАНОВ, Российский университет дружбы народов

УДК 614.7

ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЭЦ ОТ ОКСИДОВ СЕРЫ И АЗОТА

Одной из приоритетных задач экологии является очистка дымовых газов ТЭЦ от оксидов азота и серы. В связи с этим представляет интерес разработка новых способов очистки дымовых газов от оксидов азота и серы, обеспечивающих при минимальных капитальных затратах и простоте технологической схемы наибольшую степень очистки.

Исследования проводили в несколько этапов. На первом этапе определяли влияние параметров работы котла (тип топлива, размол угля, расход воздуха, нагрузка по котлу) и системы водоочистки (расход воды на абсорбер, рН воды, подаваемой на абсорбер) на содержание оксидов в дымовых газах.

Химический анализ газообразных выбросов проводили по методикам, регламентированным

ГОСТ. Определение оксида серы (IV) осуществляли йодометрическим и фотокалометрическим методами с тетрахлормеруратом натрия, а оксиды азота – фотокалометрическим методом с реактивом Грисса-Илосвая. Результаты анализов приведены в табл. 1.

Установлено, что основным источником оксида серы (IV) является угольная пыль, а оксидов азота – воздух. Пределы подачи угольной пыли – 1–40 т/ч. При подаче угольной пыли от 1 до 10 т/ч содержание оксидов серы составляет 120–200 мг/м³, а от 30 до 40 т/ч – 300–350 мг/м³.

Установлено, что количество выбросов оксидов серы не зависит от размола угля; содержание оксидов азота связано с изменением нагрузки котла и расходом воздуха; пределы нагрузки котла – 160–300 т/ч. При нагрузке 160–175 т/ч количество

Таблица 1. Результаты анализов дымовых газов ТЭЦ-ПВС

| Содержание SO ₂ , мг/м ³ | Содержание NO _x , мг/м ³ | Расход воды на абсорбер, м ³ /мин | Расход угольной пыли, т/ч | Расход мазута, т/ч | Расход коксового газа, 10 ³ м ³ /ч | Расход доменного газа, 10 ³ м ³ /ч | Расход воздуха в топку, 10 ² м ³ /ч | рН воды на абсорбер | рН воды после очистки | Нагрузка по котлу, т/ч | Зольность угля, % | Размол пыли, % (сита 200) | Размол пыли, % (сита 90) |
|--|--|--|---------------------------|--------------------|--|--|---|---------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|
| 320,4 | 311,8 | 0,18 | 12 | 1,2 | 6 | 50 | 200 | 8,18 | 6,72 | 180 | 39,7 | 4,2 | 15,7 |
| 238,6 | 330,2 | 0,18 | 20 | 0 | 8 | 60 | 190 | 8,18 | 9,31 | 200 | 38,0 | 2,3 | 16,1 |
| 116,6 | 192,6 | 0,18 | 7 | 0 | 1 | 50 | 180 | 8,18 | 8,37 | 195 | 42,2 | 3,7 | 15,8 |
| 305,2 | 133,8 | 0,18 | 1 | 0 | 1 | 50 | 180 | 8,18 | 9,73 | 195 | 42,7 | 3,2 | 15,1 |
| 206,0 | 429,8 | 0,21 | 8 | 0,8 | 2 | 20 | 180 | 8,23 | 4,57 | 170 | 41,0 | 7,3 | 14,2 |
| 296,3 | 383,4 | 0,21 | 13 | 0,4 | 1 | 60 | 190 | 8,09 | 6,39 | 205 | 50,1 | 3,2 | 19,4 |
| 371,1 | 551,7 | 0,21 | 16 | 0,8 | 1 | 40 | 200 | 7,91 | 6,16 | 210 | 42,3 | 1,9 | 12,8 |
| 272,1 | 483,3 | 0,21 | 16 | 1,2 | 2 | 60 | 190 | 8,87 | 6,52 | 210 | 51,2 | 5,6 | 26,8 |
| 317,3 | 379,8 | 0,21 | 7 | 0,8 | 1 | 40 | 180 | 8,13 | 4,17 | 195 | 41,2 | 0,8 | 9,4 |
| 250,0 | 257,7 | 0,21 | 15 | 1,2 | 1 | 20 | 200 | 8,18 | 7,60 | 165 | 41,4 | 5,3 | 15,3 |
| 371,0 | 129,5 | 0,18 | 18 | 1,2 | 1 | 40 | 190 | 8,18 | 2,68 | 205 | 41,3 | 1,6 | 16,4 |
| 341,0 | 232,0 | 0,18 | 25 | 1,2 | 1 | 30 | 205 | 8,34 | 9,02 | 190 | 44,9 | 2,4 | 13,8 |
| 393,0 | 121,3 | 0,21 | 34 | 0,8 | 1 | 30 | 200 | 8,40 | 9,50 | 220 | 51,7 | 0,2 | 4,6 |
| 198,9 | 242,5 | 0,21 | 8 | 0,8 | 2 | 0 | 175 | 8,23 | 6,67 | 180 | 41,0 | 7,3 | 14,2 |
| 381,0 | 405,6 | 0,21 | 11 | 0,8 | 2 | 45 | 200 | 8,13 | 5,13 | 185 | 41,2 | 0,8 | 9,4 |

оксидов азота в дымовых газах составляет 130–250 мг/м³, а при нагрузке 250–300 т/ч – 250–390 мг/м³. Расход воздуха колеблется от 160·10² до 215·10² м³/ч. Чем больше расход воздуха, тем больше содержание оксидов азота.

Показано, что пределы расхода воды на абсорбер – 0,13–0,28 м³/мин. При расходе воды 0,10–0,18 м³/мин содержание оксидов серы в отходящих газах составляет 240–350 мг/м³, а при 0,21–0,28 м³/мин – 140–300 мг/м³. Из этих сравнительных данных видно, что увеличение расхода воды положительно влияет на очистку от оксидов серы. На извлечение оксидов азота изменение расхода воды влияет незначительно, что связано с несолеобразующими свойствами оксида азота (II).

Вода, подаваемая на скруббер, имеет pH 7,9–8,8. Слабощелочная среда абсорбента связана с уносом части золы с отходящими газами. Так как оксиды серы и азота, кроме NO, проявляют кислотные свойства, то повышение pH воды положительно сказывается на очистке.

Представляло интерес определить зависимость содержания двуокиси серы и оксидов азота от состава и количества подаваемого топлива. Для этого фиксировали количество оксидов серы и азота в дымовых газах до очистки (табл. 2) и определяли графическую зависимость концентрации от состава топлива (рис. 1, 2). Известно, что основным источником сернистых соединений, ответственных за образование диоксида серы, является угольная пыль. Содержание серы в других компонентах топлива значительно меньше, поэтому в первом приближении можно допустить линейный характер зависимости концентрации SO₂ в дымовых газах от расхода угольной пыли. Поэтому, чтобы снизить содержание двуокиси серы, достаточно уменьшить расход угольной пыли.

Таблица 2. Влияние состава топлива на концентрацию SO₂ и NO_x в дымовых газах

| Расход | | | | | Нагрузка по котлу, т/ч | Содержание, мг/м ³ | |
|--------------------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------|
| угольной пыли, т/ч | мазута, т/ч | коксового газа, нм/ч·10 ³ | доменного газа, нм/ч·10 ³ | воздуха, нм/ч·10 ³ | | SO ₂ | NO _x |
| 6 | 0,8 | 1 | 10 | 18,0 | 180 | 1206 | 608 |
| 8 | 1,6 | 1 | – | 17,0 | 200 | 1290 | 697 |
| 6 | 1,0 | 2 | 30 | 18,0 | 180 | 1211 | 645 |
| 30 | 1,6 | 1 | 10 | 19,0 | 210 | 1820 | 693 |
| 22 | 1,0 | 1 | 15 | 20,0 | 210 | 1530 | 691 |
| 11 | 1,0 | 1 | 15 | 20,0 | 210 | 1390 | 647 |
| 6 | 0,8 | 2 | 0 | 18,0 | 170 | 1186 | 527 |
| 8 | 0,8 | 2 | 0 | 17,5 | 180 | 1297 | 547 |

Зависимость содержания оксидов азота от состава топлива получить несколько сложнее. Счи-

тается, что основной вклад в образование NO_x вносит температурный показатель, который зависит от теплотворной способности топлива и его состава.

Обработкой экспериментальных данных методами математической статистики были получены уравнения зависимости выбросов от приведенных выше параметров. Установлена связь между следующими факторами: X₁ и X₅ (r = –0,374), X₁ и X₃ (r = –0,345), X₂ и X₃ (r = 0,35), X₂ и X₁₂ (r = –0,359), X₃ и X₄ (r = –0,485), X₅ и X₈ (r = 0,362), X₅ и X₉ (r = 0,525), X₅ и X₉ (r = 0,427), X₅ и X₁₀ (r = –0,483), X₉ и X₁₀ (r = 0,365), X₁₁ и X₁₂ (r = 0,392) и т. д., а также между функцией отклика и технологическими факторами: Y₁ и X₃ (r = 0,30), Y₁ и X₄ (r = –0,54), Y₁ и X₆ (r = –0,26), Y₁ и X₇ (r = 0,31), Y₁ и X₈ (r = –0,397), Y₂ и X₄ (r = 0,394), Y₂ и X₈ (r = –0,397), Y₂ и X₁ (r =

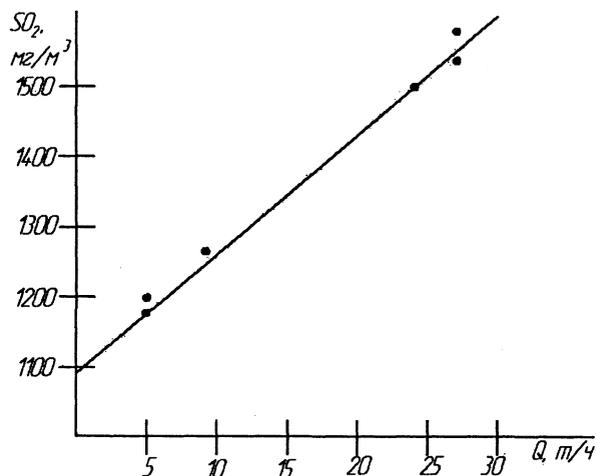


Рис. 1. Зависимость выбросов диоксида серы от расхода угольной пыли: Q – расход угольной пыли, т/ч; SO₂ – концентрация диоксида серы в дымовых газах до газоочистки, мг/м³

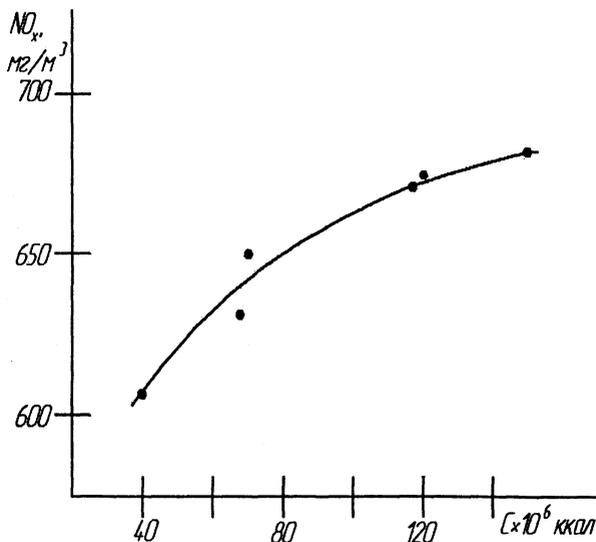


Рис. 2. Зависимость содержания NO_x от калорийности топлива: NO_x – концентрация оксидов азота в выбросах до газоочистки, мг/м³; C – суммарная калорийность топлива

0,35), где Y_1 – содержание SO_2 в дымовых газах; Y_2 – содержание NO_x .

Методом пошаговой регрессии получены уравнения, определяющие содержание оксидов серы и азота ($R = 0,82-0,84$). Так, для определения содержания оксида серы уравнение имеет вид

$$Y_1 = 1674,5 + 1,45X_2 + 31,29X_3 - 10,32X_4 + 1,6X_5 - 1,592X_6 - 136,26X_7 - 7,195X_8.$$

Уравнение учитывает 67,24% вариации отклика Y .

Из них на X_2 приходится $0,197 \cdot 0,061 \cdot 100 = 1,2\%$, на $X_3 - 0,254 \cdot 0,299 \cdot 100 = 7,32\%$, на $X_4 - (-0,548) \cdot (-0,355) \cdot 100 = 19,45\%$, на $X_5 - 0,43 \cdot 0,183 \cdot 100 = 7,87\%$, на $X_6 - (-0,26) \cdot (-0,279) \cdot 100 = 7,25\%$, на $X_7 - (-0,306) \cdot (-0,554) \cdot 100 = 16,90\%$, на $X_8 - (-0,397) \cdot (-0,197) \cdot 100 = 7,82\%$.

Аналогично для определения содержания оксида азота:

$$Y_2 = 439,34 + 698,68X_1 + 22,178X_4 - 1,05X_6 - 24,788X_8.$$

Уравнение учитывает 70,5% вариации отклика Y_2 .

Из них на X_1 приходится $0,237 \cdot 0,225 \cdot 100 = 5,33\%$, на $X_4 - 0,394 \cdot 0,665 \cdot 100 = 26,2\%$, на $X_6 - (-0,123) \cdot (-0,186) \cdot 100 = 2,29\%$, на $X_8 - (-0,37) \cdot (-0,64) \cdot 100 = 23,68\%$.

Для выявления параметров, отвечающих за объемы выбросов, провели их многофакторную оптимизацию. В результате был получен ряд областей оптимума (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Оптимальные данные для минимальных выбросов оксидов азота и серы

| Наименование параметров | Обозначения | Оптимальные значения |
|--|-------------|------------------------------|
| Расход воды на абсорбер, м ³ /мин | X_1 | $0,21 \leq X_1 \leq 0,25$ |
| Расход угольной пыли, т/ч | X_2 | $36,3 \leq X_2 \leq 40,0$ |
| Расход мазута, т/ч | X_3 | $1,39 \leq X_3 \leq 1,5$ |
| Расход коксового газа, нм ³ /ч | X_4 | $3,34 \leq X_4 \leq 5,20$ |
| Расход доменного газа, нм ³ /ч | X_5 | $25,4 \leq X_5 \leq 60,0$ |
| Расход воздуха в топку, м ³ /ч | X_6 | $202,5 \leq X_6 \leq 205$ |
| Вода на абсорбер, pH | X_7 | $8,81 \leq X_7 \leq 8,87$ |
| Вода после очистки, pH | X_8 | $10,1 \leq X_8 \leq 10,3$ |
| Нагрузка по котлу, т/ч | X_9 | $214,5 \leq X_9 \leq 220$ |
| Зольность угля, % | X_{10} | $50,6 \leq X_{10} \leq 51,7$ |
| Размол пыли (сита 200), % | X_{11} | $6,8 \leq X_{11} \leq 7,3$ |
| Размол пыли (сита 90), % | X_{12} | $21,9 \leq X_{12} \leq 23,9$ |

Расчеты показали, что если регулирование технологических параметров осуществлять в установленных пределах, то выбросы оксидов серы составят не менее 200 мг/м³, а оксидов азота – 250 мг/м³. Так, из табл. 3 видно, что выбросы ок-

сидов азота и серы будут снижаться, если расход воды на абсорбер установлен на максимальном уровне, причем сильно зависит от зольности угля и pH воды на входе и выходе из абсорбера. Существует оптимальная нагрузка по котлу, если она меньше или больше расчетного значения, то сильно возрастают выбросы оксидов серы и азота. От расхода воздуха в топку очень сильно зависит количество выбросов оксидов азота. Чем выше зольность угля, тем сильнее связываются оксиды серы на стадии абсорбции, т. е. зольность угля действует аналогично добавкам извести в топку. Чем сильнее размол угля и больше доля фракций сита 90, тем ниже объем газовых выбросов.

Очистка газов от двуокиси серы и оксидов азота

Очистку газов от двуокиси серы и оксидов азота проводили при помощи технической и осветленной воды. опыты проводили с учетом стехиометрических соотношений оксидов и реагента, а также с увеличением этого соотношения в сторону повышения расхода реагента. Результаты опытов приведены в табл. 4, 5.

Т а б л и ц а 4. Данные работы скруббера при подаче технической воды

| Содержание до очистки, мг/м ³ | | Содержание после очистки, мг/м ³ | | Сорбция, % | |
|--|-----------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| NO _x | SO ₂ | NO _x | SO ₂ | NO _x | SO ₂ |
| 608 | 1206 | 541,12 | 542,7 | 11 | 55 |
| 697 | 1290 | 641,24 | 709,5 | 8 | 45 |
| 545 | 1211 | 495,95 | 605,5 | 9 | 50 |
| 693 | 1820 | 637,56 | 1092 | 8 | 40 |
| 691 | 1530 | 628,81 | 765 | 9 | 50 |
| 647 | 1390 | 575,83 | 653,3 | 11 | 53 |
| 527 | 1186 | 458,49 | 533,7 | 13 | 55 |
| 574 | 1297 | 499,38 | 648,5 | 13 | 50 |

Т а б л и ц а 5. Данные работы скруббера при подаче осветленной воды

| Содержание до очистки, мг/м ³ | | Содержание после очистки, мг/м ³ | | Сорбция, % | |
|--|-----------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| NO _x | SO ₂ | NO _x | SO ₂ | NO _x | SO ₂ |
| 608 | 1206 | 395,2 | 301,5 | 35 | 75 |
| 697 | 1290 | 487,9 | 452,5 | 30 | 65 |
| 545 | 1211 | 438,6 | 424,0 | 32 | 65 |
| 693 | 1820 | 485,1 | 910,0 | 30 | 50 |
| 691 | 1530 | 483,7 | 612,0 | 30 | 60 |
| 647 | 1390 | 420,5 | 556,0 | 35 | 60 |
| 527 | 1186 | 289,8 | 296,5 | 45 | 75 |
| 574 | 1297 | 347,0 | 453,0 | 40 | 65 |

При добавлении раствора извести средняя степень очистки составляет около 70% по двуокиси серы и 30–35% по оксидам азота. В большей

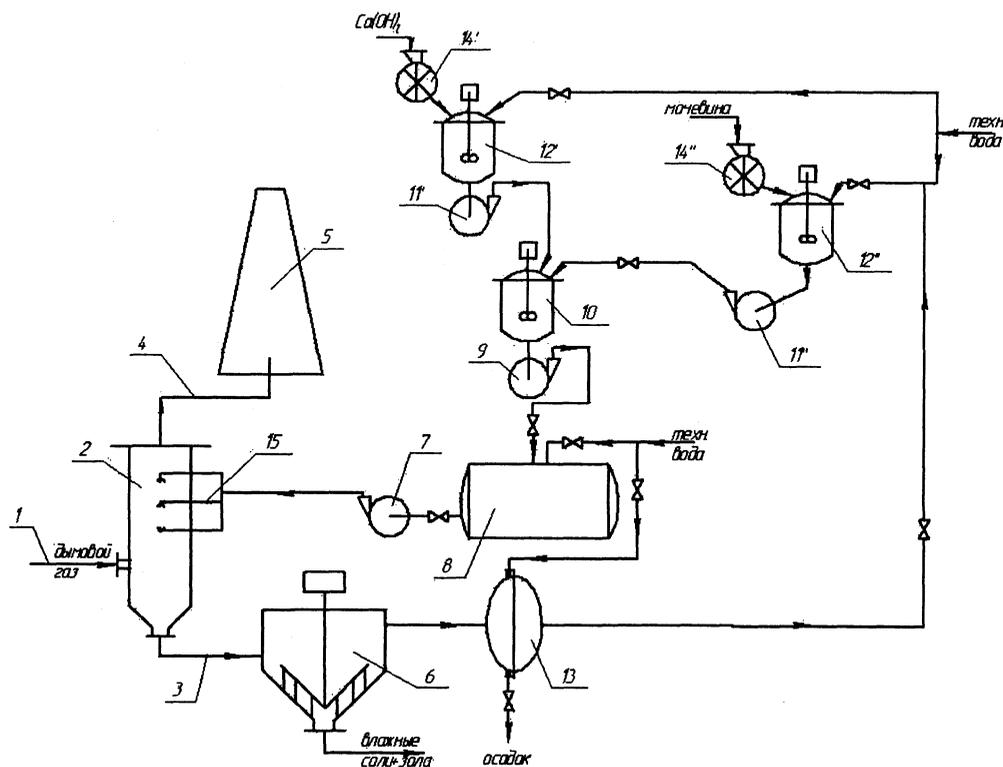


Рис. 3. Технологическая схема очистки дымовых газов от золы и оксидов серы и азота

степени очистки связана с тем, что из оксидов азота, содержащихся в дымовых газах, в реакцию с раствором извести вступает солеобразующий оксид NO_2 , а NO в реакцию не вступает.

В исследованиях с использованием наиболее доступных и дешевых хемосорбентов (соды, мочевины и их смесей) концентрации соды и мочевины составляли 20%, а количество подаваемых растворов определяли с учетом их мольных соотношений с примесными оксидами. При этом раствор соды, имеющий основной характер, связывает кислотные оксиды (КО), такие, как SO_2 , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 , N_2O_5 ; очистка от несолеобразующих оксидов (NO и N_2O) осуществляется взаимодействием с раствором мочевины. Результаты экспериментов приведены в табл. 6.

Таблица 6. Исследование влияния ввода реагентов в дымовые газы ТЭЦ ПЭС на очистку от оксидов серы и азота

| Раствор | Стехиометрическое соотношение | До очистки | | После очистки | | Степень очистки | |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
| | | SO_2 , мг/м ³ | NO_x , мг/м ³ | SO_2 , мг/м ³ | NO_x , мг/м ³ | SO_2 , % | NO_x , % |
| Сода 20% (1) | 1:1 | 520 | 450 | 170 | 360 | 67 | 20 |
| | 1:1,1 | 390 | 580 | 110 | 460 | 71 | 20 |
| | 1:1,2 | 460 | 670 | 130 | 500 | 71 | 25 |
| Мочевина 20% (2) | 1:1 | 320 | 750 | 190 | 80 | 40 | 89 |
| | 1:1,1 | 540 | 480 | 320 | 180 | 40 | 62 |
| | 1:1,2 | 180 | 820 | 70 | 320 | 61 | 60 |
| 1 + 2 | 1:1 | 540 | 760 | 180 | 390 | 66 | 48 |
| 1 + 2 | 1:1 | 620 | 560 | 174 | 213 | 72 | 62 |

При использовании в качестве хемосорбентов растворов соды и мочевины мольные соотношения Хемсорбент/КО изменяли в пределах от 1:1 до 1:1,2. Данные, приведенные в таблице, показывают, что применение при очистке дымовых газов ТЭЦ растворов соды и мочевины обеспечивает их степень очистки от оксидов азота и серы до 71 и 89%; применение растворов соды и мочевины дает максимальную глубину очистки: по оксидам азота порядка 60%, а по оксидам серы – 70%.

Технологическая схема очистки дымовых газов

В результате исследований была разработана технологическая схема очистки дымовых газов от золы и оксидов серы и азота (рис. 3).

Схема работает следующим образом. Дымовые газы из котла по газопроводу 1 поступают в золоуловитель-абсорбер 2, куда для улавливания золы и оксидов через форсунки 15 впрыскивается водный раствор с реагентами. Из золоуловителя-абсорбера газы собираются в коллектор 4 и из него направляются в дымовую трубу 5 для сброса в атмосферу. Образованная в золоуловителе-абсорбере пульпа поступает в отстойник 6, где вода осветляется и освобождается от солей и золы. Осветленная вода проходит фильтр 13, который периодически очищается технической водой. Отфильтрованная вода, а также свежая техническая вода собираются в емкости 12' и 12''. Первая ем-

кость предназначена для приготовления раствора соды, вторая – для раствора мочевины. Приготовление растворов дозируется секторными питателями 14' и 14''. Приготовленные растворы насосами 11' и 11'' перекачивают в емкость 10, а из нее насосом 9 – в сборник 8. Из сборника 8 насосом 7 раствор подается в форсунки 15. Зола направляется в отвал.

Выводы

1. Установлены зависимости выбросов оксидов азота и двуокиси серы от температурного режима в топке котлов и состава сжигаемого топлива. Определен оптимальный режим работы кот-

лов ТЭЦ-ПВС по математической модели процесса образования оксидов серы и азота.

2. Показано, что применение при очистке дымовых газов ТЭЦ растворов соды и мочевины обеспечивает степень их очистки от оксидов азота и серы до 71 и 89%; применение растворов соды и мочевины дает максимальную глубину очистки: по оксидам азота до 60%, а по оксидам серы – 70%.

3. Разработана технологическая схема очистки дымовых газов от золы и оксидов серы и азота, позволяющая достигнуть максимальной степени очистки при минимальных затратах.