

И.Н. Шмиголь, канд. техн. наук

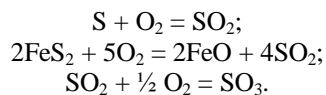
(Россия, Москва, ОАО "Всероссийский теплотехнический институт")

СЕРООЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ РОССИИ

Сжигание органического сернистого топлива связано с образованием диоксида серы SO_2 , который является активным загрязнителем окружающей среды. В связи с завершением «газовой паузы» на тепловых электростанциях России увеличивается сжигание углей. В абсолютном исчислении количество сжигаемого угля увеличится более чем в пять раз. А это повлечёт за собой соответствующее увеличение массы генерируемого диоксида серы.

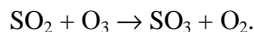
Любое органическое топливо, кроме природного газа некоторых месторождений, содержит серу либо как составную часть его органической массы (органическая сера), либо в виде серного колчедана FeS_2 , входящего в минеральную часть твёрдого топлива.

При окислительном сжигании топлива, которое в энергетике является преобладающим, из органической и колчеданной серы образуются диоксид и триоксид серы:

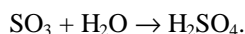


Конверсия диоксида в триоксида, происходящая в топочной камере котла под действием высокой температуры, составляет обычно до 5 %.

В земной атмосфере диоксид серы под действием озона, образующегося из кислорода воздуха в результате солнечной радиации, окисляется до триоксида SO_3 :



Триоксид серы соединяется с водяными парами воздуха, в результате образуются пары серной кислоты:



Озон окисляет также оксиды азота до высших окислов с конечным образованием паров азотной кислоты HNO_3 . В итоге образуется смесь двух кислот, которая по своей активности и способности растворять тяжелые металлы приближается к «царской» водке (смеси серной и соляной кислот). Пары этих обеих кислот имеют плотность в 3-4 раза больше плотности воздуха, что обеспечивает их интенсивное гравитационное осаждение. Поэтому в атмосферном воздухе оксиды серы «живут» до трёх суток и осаждаются на растительность, здания, почву и в природные водоемы преимущественно в виде паров серной кислоты. Атмосферные осадки ускоряют поступление смеси этих кислот в почву. Вымывание из атмосферы кислых компонентов дымовых газов обуславливает кислотные (или кислые) дожди. В результате пресноводные водоемы и реки быстро закисляются, что приводит к гибели части водной флоры и фауны или замене их другими, более стойкими формами, но которые не обеспечивают необходимую регенерацию воды.

Процесс закисления пресноводных источников усугубляется тем, что смесь серной и азотной кислот хорошо растворяет тяжелые металлы, содержащиеся в минеральной части почвы, в том числе, и в золе, осаждающейся на почву. Эти растворённые металлы переносятся грунтовыми водами в пресные водоёмы, отравляя, таким образом, все живые организмы, включая человека.

Поведение диоксида серы в воздухе характеризуется ещё и тем, что примерно 90% SO_2 выпадает из дымовых газов на почву в радиусе 15-25 высот дымовых труб. И только около 10% переносятся в другие, близлежащие регионы под действием атмосферных потоков. Поэтому очистка дымовых газов от оксидов серы (и сопутствующих им оксидов азота) является как глобальной, так и локальной проблемой.

Основными энергетическими углями России являются угли следующих месторождений:

- в Европе: Печорского, Подмосковного и Донецкого;
- в Сибири: Кузнецкого и Берёзовского;
- в Восточной Сибири: Харанорского.

На ряде электростанций Урала сжигают экибастузские угли.

Характеристики некоторых российских углей приведены в табл. 1, а основные характеристики продуктов их сгорания - в табл. 2.

Таблица 1.

Характеристики наиболее распространённых энергетических углей России.

Месторождение, марка угля	Теплотворность, МДж/кг	Содержание на рабочую массу, %			Содержание в золе СаО, %
		A ^r	W ^r	S ^r	
Интинское, Д	16,87	28,8	11,5	2,45	6,9
Подмосковное, Б2	8,67	30,5...32,4	31,0	2,58	4,1
Донецкое, Г	18,92	29,0	10,0	3,61	2,5
Д	17,25	27,8	13,0	2,84	2,0
АШ	19,05	32	9,0	1,54	2,9
Кузнецкое, Д	21,39	15,3	12,5	0,43	5,5
Г	23,11	17,3	9,0	0,44	4,3
Т	25,54	17,2	7,0	0,45	1,9
СС	24,87	12,7	9,5	0,47	4,3
Берёзовское, Б2	15,66	4,7	33,0	0,19	42
Харанорское, Б1	11,97	12,2	39,0	0,29	7,3
Экибастузское, СС	16,12	40,4	6,0	0,54	1,0

(русские обозначения марок углей: Г – газовый; Д – длиннопламенный; АШ – антрацитный штыб; Т – тощий; СС - слабоспекающийся; Б – бурый).

Таблица 2.

Основные характеристики основных энергетических углей России.

Месторождение, марка угля	Удельный объём газов, нм ³ /кг	Запылённость газов, г/нм ³	Приведенная сернистость топлива, %×кг/МДж	Содержание диоксида серы в газах		Степень связывания SO ₂ в топке, %
				г/МДж	г/нм ³	
Интинское, Д	6,752	40,47	0,145	2,97	7,43	1,46
Подмосковное, Б2	4,110	70,73	0,298	6,10	12,86	0,70
Донецкое, Г	7,648	35,78	0,190	3,91	9,67	0,26
Д	6,960	38,00	0,165	3,38	8,36	0,22
АШ	7,464	40,54	0,081	1,66	4,22	0,63
Кузнецкое, Д	8,449	17,22	0,020	0,412	1,05	2,33
Г	9,089	18,07	0,019	0,39	1,0	1,76
Т	9,886	16,53	0,018	0,361	0,94	0,53
СС	9,704	12,40	0,019	0,387	0,99	1,35
Берёзовское, Б2	6,757	6,59	0,012	0,164 ^{*)}	0,57	34,05
Харанорское, Б1	5,395	21,48	0,024	0,497	1,11	3,95
Экибастузское, СС	6,434	59,68	0,034	0,687	1,71	0,35

^{*)} – с учётом связывания в топочной камере.

Санитарно-экологическое законодательство России основывается как на предельно-допустимых концентрациях (ПДК) загрязняющих веществ в воздухе на уровне дыхания человека, так и на нормативах выбросов этих веществ от стационарных источников в атмосферу. Последние регламентируются ГОСТ Р 50831-95 (который сейчас пересматривается), в том числе и по нормативам выбросов диоксида серы (табл. 3).

Таблица 3.

Нормативы удельных выбросов диоксида серы по ГОСТ Р 50831-95.

Тепловая мощность, МВт _т (расход пара, т/ч)	Удельный выброс, г/МДж		Ориентировочная концентрация, мг/нм ³ (при α = 1,4)	
	S ⁿ ≤ 0,045 %.кг/МДж	S ⁿ > 0,045 %.кг/МДж	S ⁿ ≤ 0,045 %.кг/МДж	S ⁿ > 0,045 %.кг/МДж
до 199 (до 320)	0,5	0,6	1200	1400
200-249 (320-400)	0,4	0,45	950	1050
250-299 (400-420)	0,3	0,3	700	700
≥ 300 (≥ 420)	0,3	0,3	700	700

В качестве базового значения приняты удельные выбросы **n** (г/МДж), которые пересчитываются в значения концентрации **C** по формуле:

$$C = n \times Q_i^r / V_0^r, \text{ г/нм}^3, \quad (1)$$

где Q_i^r – низшая теплотворность угля, МДж/кг; V_0^r – удельный объём газов при сжигании одного килограмма угля при заданном избытке воздуха, нм³/кг.

Удельный выброс позволяет легко сравнивать между собой различные сжигающие устройства, работающие с различными коэффициентами избытка воздуха.

Нормативы удельных выбросов SO₂ регламентируются в зависимости от тепловой мощности котельной установки и приведенной сернистости сжигаемого топлива:

$$S^n = S^r / Q_i^r, \text{ %.кг/МДж}$$

где S^r - содержание серы в топливе, %, отнесённое к его рабочей массе.

Наряду с требованиями этого ГОСТа с 1 июля 2004 года к тепловым электростанциям, расположенным на европейской территории страны, применяются и требования II Протокола к Международной Конвенции о трансграничном переносе (МКТП) диоксида серы (табл. 4).

Таблица 4.

Нормативы для диоксида серы по МКТП SO_2 .

Тепловая мощность, МВт	Предельное значение концентрации, мг/нм ³ ($\alpha=1,4$)	Степень улавливания диоксида серы, %
50 – 100	2000	40 (для 100-167 МВт)
100 – 500	2000 – 400 (линейное уменьшение)	40 – 90 (линейное уменьшение для 167 – 500 МВт)
≥ 500	400	90

В этих нормативах установлены как предельное значение концентрации диоксида серы, так и требуемая степень очистки газов от этого вещества. Каждая страна, подписавшая Протокол и Международную конвенцию, может выбрать ограничение по выбросам диоксида серы или в виде концентрации этого вещества в газах, выходящих из котла, или в виде степени очистки дымовых газов каждого котла. Некоторые страны (Япония, США, Европейский экономический союз) требуют одновременного обеспечения и концентрации, и степени сероочистки.

В настоящее время намечена гармонизация российских нормативов на выбросы диоксида серы с директивой 2001/80 ЕЭС Европейского экономического сообщества. Для новых энергетических установок, сжигающих уголь, этой директивой установлены следующие нормативы:

Тепловая мощность, кВт _г :	50...100	100...300	>300
Концентрация SO_2 , мг/нм ³ :	850	200	200.

Использование в качестве базового показателя значения удельного выброса позволяет упростить расчёты, связанные с определением степени очистки газов.

Удельное количество SO_2 , образующееся при сжигании угля, n' без учёта частичного связывания этого вещества в топке щёлочью золы подсчитывается по формуле:

$$n' = 20,5 S^n, \text{ г/МДж.}$$

Степень сероочистки на основе удельных выбросов подсчитывается как:

$$\eta_{SO_2} = \frac{n' - n''}{n'} \times 100, \%$$

где n'' , г/МДж – удельный выброс диоксида серы в атмосферу в соответствии с санитарным законодательством.

На основе значения удельного выброса n' или n'' рассчитывается количество этого вещества, отнесённое к выработанному киловатт-часу, соответственно

- образующегося при сжигании топлива: $g' = 29,308 \cdot 10^{-3} \cdot q_{y.t.} \cdot n'$, г/кВт-ч,
- выбрасываемого в атмосферу: $g'' = 29,308 \cdot 10^{-3} \cdot q_{y.t.} \cdot n''$, г/кВт-ч,

где $q_{y.t.}$ - удельный расход условного топлива на выработку одного киловатт-часа.

При расчёте степени сероочистки дымовых газов необходимо учитывать и частичное связывание SO_2 в топочной камере щелочными компонентами золы. Как видно из таблицы 2, для подавляющего большинства российских углей (кроме углей Берёзовского месторождения), степень связывания диоксида серы в топке не превышает 4 %, и ею можно пренебречь.

Требуемые степени сероочистки продуктов сгорания угля, приведенных в таблицах 1 и 2, для котлов паропроизводительностью 320 и 950 т/ч показаны в табл. 5.

Таблица 5.

Требуемые степени сероочистки дымовых газов по ГОСТ Р 50831-95 и по II Протоколу к МКТП SO_2 .

Месторождение, марка угля	Паропроизводительность котла, т/ч	Требуемая степень сероочистки, %		
		по ГОСТ Р 50831-95	по II Протоколу к МКТП	по директиве 2001/80 ЕЭС
Интинское, Д	320	84,85	78,45	97,31
	950	89,90	94,61	97,31
Подмосковное, Б2	320	92,62	87,57	98,44
	950	95,08	96,89	98,44
Донецкое, Г	320	88,49	83,20	97,93
	950	92,33	95,86	97,93
Донецкое, Д	320	86,69	80,89	97,63
	950	91,12	95,27	97,63

Донецкое, АШ	320	72,89	62,23	95,27
	950	81,93	90,54	95,27
Кузнецкое, Д	320	2,91	0	80,70
	950	27,18	61,41	80,70
Кузнецкое, Г	320	0	0	79,87
	950	23,07	59,74	79,87
Кузнецкое, Т	320	0	0	78,53
	950	16,90	57,06	78,53
Кузнецкое, СС	320	0	0	79,84
	950	22,48	59,69	79,84
Берёзовское, Б2	320	0	0	46,34
	950	0	0	46,34
Харанорское, Б1	320	9,46	0	81,89
	950	39,63	63,78	81,89
Экибастузское, СС	320	34,50	6,99	88,36
	950	56,33	76,71	88,36

Расчёт степени сероочистки газов также можно вести также и по концентрациям SO_2 в исходных C' и очищенных C'' газах при обязательном условии, что эти концентрации приведены в одну концентрацию кислорода в газах:

$$\eta_{SO_2} = (C' - C'') \cdot 100 / C', \%$$

В противном случае будут получены только фиктивные значения η_{SO_2} , не соответствующие фактическому состоянию газоочистки.

Концентрации диоксида серы в очищенных газах, регламентированные требованиями II Протокола к МКТП и нормативами Европейского сообщества были пересчитаны в значения удельного выброса по формуле (1) (табл. 6). Для котлов паропроизводительностью 320 т/ч (200 МВт_т) значения концентраций SO_2 были приняты равными соответственно 1600 мг/нм³ и 200 мг/нм³; для котлов паропроизводительностью 950 т/ч (> 300 МВт_т) – 400 мг/нм³ и 200 мг/нм³.

Таблица 6.

Значения удельного выброса SO_2 , пересчитанные по концентрациям.

Месторождение, марка угля	Значение удельного выброса диоксида серы при концентрации		
	1600 мг/нм ³	400 мг/нм ³	200 мг/нм ³
Интинское, Д	0,640	0,160	0,0800
Подмосковное, Б2	0,758	0,190	0,0950
Донецкое, Г	0,657	0,162	0,0810
Д	0,646	0,160	0,0800
АШ	0,627	0,157	0,0785
Кузнецкое, Д	0,636	0,159	0,0795
Г	0,629	0,157	0,0785
Т	0,619	0,155	0,0775
СС	0,624	0,156	0,0780
Берёзовское, Б2	0,690	0,179	0,0880
Харанорское, Б1	0,721	0,180	0,0900
Экибастузское, СС	0,639	0,160	0,0800

Из таблицы 5 следует, что требуемая степень сероочистки дымовых газов зависит как от свойств угля и тепловой мощности котла, так и от принятого норматива выброса SO_2 . Так, при сжигании малосернистого Берёзовского бурого угля с большим содержанием оксида кальция в золе, когда степень связывания диоксида серы в топочной камере достаточно велика, дополнительная сероочистка дымовых газов для обеспечения требований ГОСТ и МКТП не требуется. Для котлов средней паропроизводительности (320 т/ч) по этим нормативам при сжигании большинства кузнецких углей также не требуется дополнительных мероприятий по снижению выброса SO_2 в атмосферу, или степень улавливания диоксида серы должна быть небольшой (для Харанорского угля – 9,46 %). При увеличении тепловой мощности котельных агрегатов дополнительные мероприятия по сероочистке, как правило, требуются.

Широкий диапазон требуемых степеней сероочистки для удовлетворения нормативов ГОСТ и II Протокола к МКТП не позволяет обойтись одной или двумя технологиями, а требует достаточно большого набора методов очистки – мокрые, мокро-сухие и сухие. Этим будут обеспечены минимальные капитальные вложения и эксплуатационные затраты в установки сероочистки.

Применение нормативов Европейского экономического сообщества потребует обеспечения степени сероочистки не ниже 79%, а при сжигании Берёзовского угля – дополнительной очистки газов на 46,34%.

Здесь преимущественное применение получают мокрые технологии, и лишь в некоторых случаях – мокро-сухие.

Отечественная наука разработала и освоила широкий набор технологий сероочистки, позволяющий обеспечить нормативы выброса диоксида серы при действии любого из указанных директивных документов: ГОСТ, II Протокола к МКТП или 2001/80 ЕЭС.

Обеспечить указанные степени улавливания SO_2 можно различными технологиями, выбор которых определяется их технико-экономическими характеристиками. Общий принцип выбора технологии в зависимости от начальной концентрации диоксида серы основан на том, что при небольшой степени сероочистки (30-35 %) целесообразны дешёвые технологии; при этом возможно использование активного дорогого реагента; при большой степени сероочистки (80 % и более) необходимы дорогие технологии с использованием сравнительно дешёвых реагентов.

Относительно дешёвые технологии основаны преимущественно на использовании уже имеющегося энергетического оборудования: топочной камеры, газоходов, сухих и мокрых золоуловителей. В таких технологиях отходы сероочистки всегда смешаны с уловленной золой и складываются на общем золоотвале.

При оснащении котельных установок электрофильтрами и при небольших начальных концентрациях диоксида серы применимы технологии:

- сухая известняковая с вводом в определённую температурную зону котла известняковой пыли, которая сначала в топке котла кальцинируется с образованием оксида кальция CaO ; в конвективной шахте котла эта известь на 30...35% связывает диоксид серы;

- упрощенная мокро-сухая с подачей тонко диспергированной известковой суспензии в форкамеру электрофильтра или в газоход перед форкамерой. Жидкий реагент связывает диоксид серы, и под действием тепла дымовых газов из него испаряется вода, так что в электрофильтр поступает сухая смесь летучей золы и отходов сероочистки; охлаждение и увлажнение очищаемых газов повышают эффективность электрогазоочистки. Такая мокро-сухая технология позволяет связать SO_2 до 50 %;

- технология с циркулирующей инертной массой, когда часть уловленной золы смешивается с сухой известью и водой. Эту смесь с влажностью 5-6 % подают в газоход перед золоуловителем, и с её помощью можно уловить до 75 % SO_2 , а иногда и больше; при этом электрофизические свойства дымовых газов, как и в предыдущем случае, улучшаются.

В то же время такие сероочистки требуют специальных мер по исключению влияния на работу электрофильтра повышенной запылённости газов (микро-сухие технологии) и сниженной температуры сернокислотной точки росы (сухая технология). Повышение доли кальциевых соединений в твёрдых отходах такой газоочистки требует перехода с наиболее распространённой на отечественных ТЭС системы гидрозолоудаления (ГЗУ) на сухие технологии сбора и складирования этих отходов. Это обусловлено тем, что концентрация ионов кальция в воде превышает предельное значение, что приведёт к образованию в пульпопроводах и трубопроводах осветлённой воды трудно удаляемых карбонатных и гипсовых отложений. Альтернативой ГЗУ является применение, например, трубного транспорта, трубчатых резиновых конвейеров и других систем, что обычно связано с достаточно серьёзными и дорогими реконструктивными работами. Применяется также вывоз сухих отходов на колёсном транспорте, что наиболее распространено в США и Канаде. При этом для снижения эксплуатационных затрат на такую систему складирования на угольных ТЭС сжигают преимущественно обогащённое топливо с зольностью не более 7...10 %. Применительно к российским энергетическим углям, зольность которых обычно существенно больше, вывоз твёрдых отходов мокро-сухой газоочистки на большегрузных КАМАЗах при плече поездки 10 км увеличит себестоимость производства электроэнергии на 12...15 %; при плече поездки до 20 км увеличение себестоимости составит 27...28 %.

Особенность российских котлов малой и средней мощности состоит в том, что на них, как правило, установлены скрубберы различных конструкций, преимущественно Вентури. Эти аппараты также можно использовать для целей сероочистки дымовых газов.

Если требуется уловить до 35 % SO_2 , то в скруббере это вещество можно нейтрализовать соединениями кальция, содержащимися в летучей пыли. Последние выщелачивают в орошающую скруббер воду, что позволяет отказаться от использования дополнительных реагентов.

При необходимости улавливания до 50-60 % SO_2 мокрый золоуловитель орошают раствором соды с последующей конверсией образовавшихся солей в двухводный гипс.

Основные технико-экономические показатели технологий с использованием оборудования энергоблоков приведены в табл. 7.

Таблица 7.

Технико-экономические показатели технологий сероочистки на основе оборудования энергоблоков.

Технология	Сухая известняковая	Упрощенная мокро-сухая	Циркулирующая инертная масса	С использованием скруббера
Степень сероочистки, %	30...35	50...60	93	50...60

Коэффициент избытка реагента	2...3	1,3...1,5	1,2...1,3	1,1...1,15
Удельная площадь для оборудования, м ² /кВт	<0,0005	<0,0005	0,0005	0,001
Увеличение расхода энергии на собственные нужды, %	<0,2	0,03	0,4	<0,3
Удельные капитальные вложения, \$/кВт	2,4...3,9	1,8...5,7	15...17	10...16

Технологии с эффективностью сероочистки 80 % и более основаны, как правило, на интенсивной промывке дымовых газов суспензиями или растворами в специальных абсорберах, установленных после эффективных золоуловителей. В настоящее время наибольшее распространение получила известняковая (известковая) технология, основанная на интенсивной промывке этих газов суспензией известняка или извести. Причиной такой популярности этой технологии является то, что она использует вещества, не загрязняющие окружающую среду, а отходом сероочистки является высококачественный двухводный гипс, который также нейтрален. К настоящему времени технология отработана до такой совершенства степени, что избыток реагента по отношению к стехиометрическому соотношению не превышает 2-3 %. Однако особенность этого технологического процесса состоит в том, что время выхода на эффективную сероочистку достигает 60...72 часов, из-за чего мокрая известняковая (известковая) сероочистка предназначена для энергетических объектов, работающих в базовом режиме нагрузок при изменениях мощности. Получаемый гипс может быть двухводным $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ или безводным CaSO_4 (ангидрит, который наиболее ценен при производстве строительных материалов). Этот гипс имеет зачастую более высокие потребительские свойства (практическое отсутствие инородных веществ, высокая белизна, хороший гранулометрический состав), чем природный материал, и его часто используют при производстве строительных материалов. Однако количество гипса, получаемого при сероочистке дымовых газов весьма велико, так что полное его использование проблематично.

Альтернативой мокрой известняковой (известковой) технологии стала аммиачно-сульфатная сероочистка с получением товарного сульфата аммония. Этот продукт является эффективным сельскохозяйственным удобрением, промышленное производство которого на ближайшие 25 лет не покрывает потребности мирового рынка, а также сырьём для производства кормовых дрожжей. Более активный реагент позволяет существенно уменьшить размеры технологического оборудования и иметь соотношение «реагент: SO_2 » равное стехиометрическому. Достоинством этой технологии является также снижение на 30-35% выбросов оксидов азота. Поскольку сульфат аммония является ценным продуктом, то его продажа позволяет достаточно быстро окупать капитальные вложения в сероочистку особенно при высоких начальных концентрациях диоксида серы.

Эффективное улавливание диоксида серы получено и при промывке дымовых газов магнезитовой суспензией, тем более, что получаемый отход – сульфат магния, является хорошим сырьём для текстильной и целлюлозно-бумажной промышленности.

Наряду с применением специальных технологий и аппаратов для очистки дымовых газов от диоксида серы, которые удорожают, иногда значительно, стоимость энергетических установок, в последние годы разрабатываются технологии одновременного улавливания нескольких загрязнителей в одном аппарате. Подобная технология – озонно-аммиачная, была отработана в СССР в начале 80-х годов прошлого столетия; она обеспечила улавливание SO_2 на 90 % и NO_x на 70 %. (Подобный эффект был получен и в аммиачно-сульфатной технологии, где сульфит-бисульфитными аммонийными солями улавливалось до 30 % NO_x .) Полученный отход газоочистки представлял собой жидкую смесь сульфатов и нитратов аммония, обогащённую микроэлементами, выщелоченными из уловленной золы. Испытания этой смеси в качестве удобрения, проведенные специалистами сельского хозяйства, показали её преимущество перед обычной механической смесью сульфата аммония и аммиачной селитры. Сейчас в США разработана подобная технология под название LoTOx. Удельные капитальные вложения в неё оцениваются примерно втрое меньше, чем сооружение двух установок газоочистки – селективной каталитической для восстановления оксидов азота и мокрой известняковой. Таким образом, аммиачно-сульфатная, озонно-аммиачная и сульфатно-магниева технологии позволяют при определённых условиях окупать капитальные вложения в установки сероочистки.

Техническо-экономические характеристики мокрых технологий сероочистки на основе мировых цен на металл приведены в табл. 8.

Таблица 8.

Технология	Мокрая известняковая	Аммиачно-сульфатная	Озонно-аммиачная	Сульфатно-магниева
------------	----------------------	---------------------	------------------	--------------------

Степень сероочистки, %	95	до 99,5	99	95
Степень азотоочистки, %	-	30	90	-
Коэффициент избытка реагента	1,02...1,05	1,0	1,0	1,02...1,05
Удельная площадь для оборудования, м ² /кВт	0,04...0,05	0,02...0,04	0,02...0,04	0,04...0,05
Увеличение расхода энергии на собственные нужды, %	2...3,7	1,4...1,6	2...3	2...2,5
Удельные капитальные вложения, \$/кВт	90...130	35...60	55...60	50...60

Для очистки от диоксида серы дымовых газов тепловых электростанций, расположенных на морском побережье, может быть использована морская вода. Использование морской воды в целях сероочистки дымовых газов основано на связывании диоксида серы свободными ионами щелочноземельных и щелочных элементов, связанных с гидрокарбонатами. Для этого используют полые абсорберы, аналогичные по конструкции аппаратам, применяемым в мокрой известняковой технологии. Испытания опытных и промышленных установок показали, что при удельных расходах морской воды до 25 л/нм³ можно уловить до 90 % диоксида серы. Условия работы установки сероочистки с использованием морской воды мало отличаются от мокрой известняковой сероочистки. Но отсутствие узлов приготовления реагента и получения твёрдого двухводного гипса сильно упрощают технологическую схему, а, следовательно, удешевляют установку примерно вдвое. Значительно снижаются и эксплуатационные затраты. Следует также иметь в виду, что состав пульпы мало отличается от состава морской воды. Это позволяет сбрасывать её в море (океан) без сравнительно дорогой предварительной обработки.

Особенность всех мокрых технологий состоит также в том, что при интенсивной промывке дымовых газов в абсорберах улавливается 10-15% тонкой летучей золы.

При мокрой технологии очищенные газы имеют температуру, равную температуре мокрого термометра (в зависимости от влажности топлива и содержания в нём водорода эта температура находится в диапазоне $\approx 32...55^{\circ}\text{C}$). Это ухудшает рассеивание очищенных газов в атмосфере, а также может вызвать разрушение отводящего газохода и ствола дымовой трубы. Для подогрева газов перед их сбросом в атмосферу используют различные схемы с использованием как тепла котла, так и тепла от посторонних источников. Наибольшее распространение получили схемы с регенеративным подогревом за счёт тепла обеспыленных газов, с паровым калориферным подогревом, с паровым теплообменником и др. В последние годы стали применять рассеивание очищенных охлаждённых газов через градирни охлаждения циркуляционной воды. Это позволяет отказаться от дымовой трубы и снизить капитальные вложения в тепловую электростанцию. Но в этом случае содержание диоксида серы в газах не должно превышать 400 мг/нм³, чтобы не ухудшить качество циркуляционной воды. При этом небольшое подкисление охлаждающей воды исключает образование отложений на внутренних поверхностях конденсаторных трубок, что также благоприятно для стабильного поддержания глубокого вакуума в конденсаторах паровых турбин.

Таким образом, современные технологии сероочистки позволяют эффективно и при минимальных капитальных вложениях эффективно очищать дымовые газы ТЭС от диоксида серы и исключать вредное влияние тепловой угольной энергетики на окружающую среду через кислотные дожди и тяжёлые металлы.

Рекомендовано до друку проф. Куваевим В.Н.