

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ УЛАВЛИВАНИЯ ВЫСОКОМОМНОЙ ЗОЛЫ

Л.В. ЧЕКАЛОВ, М.Е. СМИРНОВ, В.А. ГУЗАЕВ (АО «Кондор - Эко»,
п. Семибратово, Ярославская обл., Россия)

Очистка дымовых газов от твёрдых частиц золы является одной из приоритетных задач, от решения которой зависит экологическая ситуация в России и в определённой мере судьба национального проекта «Экология» в части Федеральных проектов «Чистый воздух» и «Внедрение наилучших доступных технологий».

Потребность теплоэлектростанций в твёрдом угольном топливе составляет в пределах 23-25% и не меняется в течение последнего десятилетия. В России на сегодняшний день работают порядка 600 энергоблоков, использующих в качестве основного топлива уголь. Доля валовых выбросов за последние 10-15 лет снизилась всего лишь на 30%, что свидетельствует о необходимости реконструкции (до 95%) очистных сооружений ТЭС. Т.е. имеет место сохранение уровня выбросов золы в пределах 0,6 млн. тонн в год. При этом до 70% выбросов золы осуществляется крупными угольными станциями. Так, Рефтинская ГРЭС выбрасывает в год свыше 70 тыс. тонн золы, что составляет около 12% от всех выбросов ТЭС. Диапазон фактических выбросов золы при сжигании твёрдого топлива (таблица 1.) показывает, что для установок очистки дымовых газов, эксплуатируемых с 2001 года, фактический уровень выбросов золы составляет 150-400 мг/нм³, а уровень 200-250 мг/нм³ закреплён в информационном техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям ИТС НДТ 38-2017. Ещё более повышенный уровень выбросов разрешён для установок, введённых в эксплуатацию до 1981г. и до 2000 г. Т.е. требования по выбросам действующего ГОСТ Р 50831-95 (таблица 1) к работающим в настоящее время установками не обеспечиваются или обеспечиваются на предельном уровне. По нормативам выбросов, в странах ЕС действует директива Евросоюза, которая обязывает обеспечить эффективность фильтрации на электрических станциях с остаточной запылённостью не выше 20 мг/нм³. Это более чем в 10 раз меньше фактического уровня выбросов ТЭС в России.

Согласно рекомендациям (ГОСТ Р 54204-2010) по применению передовых технологий для обеспыливания уходящих газов на крупных ТЭС, сжигающих каменные и бурые угли, уровень выбросов пыли как для проектируемых предприятий,

Таблица 1.

Фактический уровень и требования к выбросам золы на ТЭС России, рекомендации при применении передовых технологий очистки.

Тепловая мощность котлов, МВт	Диапазон фактических выбросов (требование ИТС НДТ 38-2017), мг/нм ³ при O ₂ = 6%			ГОСТ Р 50831-95, ГОУ* введены до 31.12.2001 (с 01.01.2001), мг/нм ³	Рекомендации по применению НДТ для обеспыливания уходящих газов на крупных ТЭС, сжигающих угли (ГОСТ Р 54204 – 2010)			
	ГОУ*, введены до 1981г	ГОУ*, введены до 2000г.	ГОУ*, введены с 2001г		Уровень выбросов пыли, мг/нм ³		Эффективность очистки, %	
					Предприятия		Предприятия	
					Проектируемые	Действующие	Каменные и бурые	Бурые, низкокалорийные
50-100	1500-2000 (1200)	600-1300 (1000)	250-450 (250)	150-500 (150-250)	5-20	5-30	Электрофильтр, ≥99,5%.	Электрофильтр, ≥99,95%.
100-300	1400-2000 (1200)	400-1300 (900)	200-400 (250)		5-20	5-25	Рукавный фильтр, ≥99,95%	Рукавный фильтр, ≥99,99%.
Более 300	1300-2000 (1200)	300-1400 (900)	150-350 (200)		100-400 (50-150)	5-10		

В таблице 1: ГОУ* – газоочистные установки.

так и для действующих установлен в пределах 5-30 мг/нм³, а эффективность очистки должна составлять от 99,5% до 99,95% для электрофильтров и от 99,95 до 99,99% - для рукавных фильтров. В качестве передовых технологий рекомендуется использовать электрофильтры и рукавные фильтры.

По статистике 2015года на ТЭС в России установлено около 190 электрофильтров или около 20% от всех электрофильтров, работающих в России в различных отраслях промышленности, и 5 рукавных фильтров (0,5% от всех). Для сравнения в ЕС доля рукавных фильтров на ТЭС составляет 40%, а 60% приходится на электрофильтры. При этом доля рукавных фильтров на ТЭС в ЕС растёт из-за применения более дешёвого фильтровального материала и удорожания стоимости стали.

Для отечественной теплоэнергетики также были попытки использования рукавного фильтра. В России для угольных ТЭС имеется типоразмерный ряд рукавных фильтров с обратной продувкой. Однако отечественные рукавные фильтры на ТЭС не устанавливались. В настоящее время рукавные фильтры зарубежного производства эксплуатируются на 2-х отечественных ТЭС: Рефтинская ГРЭС – на бл.4 и бл.5 (300 МВт) фирмы «Альстом», и на бл.7 (500 МВт) фирмы «Клайд Бергеманн», а также на

котле 150 МВт бл.9 Омской ТЭЦ-5 установлен рукавный фильтр фирмы «Люхр Фильтр».

Таким образом, для очистки больших объёмов дымовых газов наибольшее распространение в отечественной теплоэнергетике получил фильтр электростатический или электрофильтр.

В таких условиях, для очистки дымовых газов целесообразно использовать современные инновационные отечественные электрофильтры типа ЭГАВ, которые работают с эффективностью, достаточной для удовлетворения требований НДТ и ГОСТ.

К настоящему времени отечественная технология электрической очистки получила наибольшее развитие, что позволило создать производство новых высокоэффективных отечественных электрофильтров. Технология базируется на результатах научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по следующим направлениям[2,3,4]:

1) по интенсификации процессов электрической очистки:

-разработана технология снижения напряжения зажигания коронного разряда, позволяющая повысить напряженность электрического поля;

-разработана технология по выравниванию пучности напряженности и тока короны по поверхности осадительного электрода, позволяющие повысить пробивные напряжения;

-разработана технология пульсирующего коронного разряда в межэлектродном промежутке, позволяющая увеличить предельный заряд за счет увеличения мгновенной напряженности на фронте пульсаций объемного заряда;

-обоснована целесообразность увеличения межэлектродного расстояния с сохранением эффективности очистки и снижением удельной металлоёмкости;

2) по конструктивному оформлению и производству элементов конструкции электрофильтра, созданных для реализации технологий по интенсификации электрической очистки:

-обоснована конструкция новых элементов коронирующих электродов и создана технология их производства;

-обоснована конструкция новых элементов осадительных электродов и создана технология их производства;

-разработаны принципы и технология производства электродов электрофильтров высотой до 18 метров;

-разработана оптимальная конструкция межэлектродного промежутка, обеспечивающая максимальные пробивные напряжения;

-разработан коронирующий электрод рамной конструкции, обеспечивающий снижение полуактивных зон по высоте электрода, повышенную эффективность удаления пыли при встряхивании и, соответственно, долговечность при повторных ударных нагрузках;

-обоснованы оптимальные конструктивные параметры электрофильтра (количество полей и межэлектродных промежутков, высота электродов и межэлектродное расстояние), обеспечивающие максимальную долговечность аппарата [5];

3) по совершенствованию процессов, улучшающих электрическую очистку:

-разработаны принципы и создана эффективная система встряхивания электродов;

-разработаны принципы и созданы долговечные конструкции узлов оборудования электрофильтров, а также регламент обслуживания работающих электрофильтров для сохранения эффективности очистки при длительной эксплуатации [6,7];

-разработана методика расчёта системы газораспределения и созданы конструктивные решения по повышению эффективности электрофильтра;

-разработана методика расчёта режимов встряхивания электродных систем по электрическим полям электрофильтра. Применение результатов расчётов обеспечивает работу электрофильтра на повышенных режимах электрического питания и долговечность механических конструкций.

Постоянное повышение технического уровня электрофильтров типа ЭГАВ является приоритетом деятельности его разработчика. В таблице 2 представлены основные технические решения по повышению эффективности работы электрофильтров ТЭС, осуществлённые с 2004 года, позволившие снизить выбросы из электрофильтра до 10 раз и более без увеличения капитальных затрат и габаритов электрофильтра.

Таблица 2.

Основные технические предложения по повышению эффективности электрофильтров ТЭС.

№ п/п	Техническое предложение	Реализация, патенты, год внедрения технического предложения	Параметры эффективности электрофильтра	
			Увеличение скорости дрейфа	Снижение выбросов
1.	Снижение напряжения зажигания коронного разряда	Выполнение элемента коронирующего электрода с минимальным радиусом кривизны, RU 2229939, RU 2448779, с 2004 г.	до 20%	в 2,2 раза
2.	Повышение пробивного	2.1. Новая технология изготовления элементов осадительного электрода,	до 10%	в 1,5 раза

	напряжения	исключающая развал концов, RU 2377071, с 2006 г.		
		2.2.Оптимальное размещение элементов электродных систем с обеспечением минимального расстояния до плоской части профиля элемента осадительного электрода, RU 2655691, с 2018 г.	до 10%	в 1,5 раза
3.	Снижение полуактивных зон	Выполнение коронирующего электрода с минимальным количеством мест стыковок отдельным рам по высоте, RU 2694661, с 2019 г.	до 12,5%	в 1,64 раза
4.	Пульсирующий режим питания электрофильтра	Для электрофильтров, улавливающих золу с высоким УЭС, с 2019 г.	до 10%	в 1,5 раза
Всего по п. 1-4			до 79,7%	в 12,2 раза
5.	Увеличение активного объёма электрофильтра «в плане» для улавливания золы с высоким УЭС.	5.1. Внедрены конструкции с увеличением активной высоты электродов на 25% (с12 до 15 метров), RU 2377071, с 2013 г.	-	в 2,6 раза
		5.2. Внедрены конструкции с увеличением активной длины полей на 16,6 % (с 3,84 до 4,48 метров), RU 2211094, с 2003 г.	-	в 1,9 раза
Всего по п.5			-	в 5,0 раз

Анализ таблицы 2 показывает, что новые конструктивные решения по отдельным узлам и сборочным единицам электрофильтров (поз. 1, 2, 3 таблицы 3) позволяют в тех же габаритах снизить выбросы более чем в 8,1 раза, а увеличение активного объёма электрофильтра (поз. 5 таблицы 3) позволяет практически решать вопросы снижения выбросов при улавливании золы с высоким удельным электрическим сопротивлением (таблица 3).

Таблица 3.

Результаты испытания электрофильтров типа ЭГАВ, используемых для очистки дымовых газов от золы при сжигании экибастузского и кузнецкого углей

Наименование ТЭС, мощность котла, сжигаемый уголь	Тип электрофильтра, Н ₀ *	Проектный объём газа, нм ³ /ч, на один э/ф (температура газа, °С)	К.П.Д. (%) / остаточная запылённость, г/нм ³ : до реконструкции и по проекту реконструкции	К.П.Д. (%) / остаточная запылённость, г/нм ³ : после реконструкции, тах результат (год испытания)	Снижение выбросов, разы	
					реконструкция	проект
1.Омская ТЭЦ-5, бл.3, 150 МВт, экибастузский уголь	ЭГАВ, 350	419 000 (137,0)	97,9 / 1,47 99,5 / 0,350	99,83 / 0,119 (2009г.)	12,35	2,94
2.Новосибирская ТЭЦ-4, бл.11, 300 МВт, кузнецкий уголь	ЭГАВ, 400	510 000 (148,5)	98,0 / 0,420 99,76 / 0,05	99,83 / 0,024 (2015г.)	17,5	2,1

3.ТЭЦ «Вунг Анг» Вьетнам, 660 МВт, уголь имеет характеристики, близкие кузнецкому углю	ЭГАВ, 400	1 056 000 (137,0)	- 99,68 / 0,120	99,87 / 0,087 (2014г.)	-	2,46
4.Рефтинская ГРЭС, бл.1, 300 МВт, экибастузский уголь	ЭГАВ, 400	349 200 (до 150)	97,80 / 1,200 99,59 / 0,250	99,62 / 0,234 (2018г.)	5,13	1,07
5.Рефтинская ГРЭС, бл.9, 500 МВт, экибастузский уголь	ЭГАВ, 400	941000 (до 190)	98,60 / 0,854 99,75 / 0,150	99,79 / 0,135 (2018г.)	6,33	1,11

В таблице 3: Н₀* - межэлектродный промежуток, мм.

Анализ таблицы 3 позволяет сделать следующие выводы:

- достигнутая электрофильтрами ЭГАВ эффективность очистки дымовых газов от золы с повышенным омическим сопротивлением, обеспечивает снижение выбросов до 17,5 раз по отношению к применяемым ранее электрофильтрам;
- эффективность очистки составляет от 99,62 до 99,87 %, что находится в границах рекомендаций по применению НДТ (99,5% и выше);
- предлагаемый тип электрофильтра (ЭГАВ) позволяет обеспечить остаточную запылённости на уровне 24 мг/нм³ для золы кузнецких углей и не более 150 мг/нм³ для золы экибастузских углей;
- электрофильтры типа ЭГАВ обеспечивают требования Заказчика по снижению выбросов при улавливании золы, образующейся при сжигании экибастузского угля, даже при реконструкции действующих электрофильтров.

Предлагаемые конструктивные решения взаимозаменяемы с конструкцией электрофильтров типа ЭГА (ЭГБ, ЭГБМ, ЭГБ1М) разработки до 2001г. При этом масса от увеличения активного объёма новых аппаратов компенсируется увеличением межэлектродного расстояния до 460...500 мм.

Проведённый опыт реконструкции действующих электрофильтров, как с наращиванием высоты аппарата, так и с разработкой нового корпуса на месте двух электрофильтров, позволил сделать вывод о том, что для достижения требуемой очистки необходимо оценивать эффективность и принимать меры не только по замене внутреннего оборудования электрофильтров, но и по распределению пылегазового потока по сечению электрофильтра на входе и на выходе, а также по повышению эффективности и надёжности пылевыгрузных устройств из-за повышенного

количества поступающей в бункера пыли. Т.е. при реконструкции требуется проводить тщательный анализ процессов, обеспечивающих эффективную очистку в электрофильтре, на уровне газоочистной установки в целом.

Таким образом, в настоящий исторический момент в России для снижения выбросов ТЭС до 10 раз и более достаточно использовать новые, эффективные и проверенные на практике технические решения, реализованные в конструкции электрофильтров типа ЭГАВ. При реконструкции ГОУ ТЭС сохраняются существующие корпуса (при необходимости с увеличением высоты и уточнением газораспределения), фундаменты (с усилением при необходимости), а капитальные затраты на реконструкцию существенно меньше, чем на установку нового газоочистного оборудования.

Что касается перспективы обеспечения выбросов на уровне $5...30 \text{ мг/нм}^3$, то при очистке дымовых газов от золы, не обладающей повышенным омическим сопротивлением, с внедрением отмеченных технических новшеств на ряде ТЭС получены выбросы от $12,6 \text{ мг/нм}^3$ до 24 мг/нм^3 [4].

В ИТС НДТ 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» предложено использовать в качестве НДТ для очистки дымовых газов на ТЭС в числе других аппаратов и **электрофильтры**. При этом решение проблемы очистки дымовых газов от высокоомной золы до уровня $5...30 \text{ мг/нм}^3$ в том числе в рамках ключевого направления деятельности технологической платформы «Экологически чистая тепловая энергетика высокой эффективности» по развитию технологий газоочистки, которые обеспечат близкие к нулевым значениям выбросы частиц золы, потребует инициирования и проведения работ по совершенствованию и практическому освоению отечественного производства рукавных фильтров и комбинированных золоуловителей (электрофильтр + рукавный фильтр). Отечественные высокоэффективные электрофильтры типа ЭГАВ и опыт их создания могут стать основой при разработке компактного и более дешёвого по сравнению с другими газоочистными устройствами комбинированного золоуловителя.

Список литературы

1. **C.R.Lund, H.V.Pedersen, A.B. Гольцев.** Выбор вариантов модернизации электрофильтров // Экология производства. 2009. №10. С.74-76.

2. **Чекалов, Л. В.** Научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения [Текст]: автореферат докторской диссертации /Л. В. Чекалов. - Москва, 2007. - 40 с.

3. **Чекалов, Л. В.** Анализ работы электрофильтров при высокой концентрации мелкодисперсной фазы [Текст] /Л. В. Чекалов. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – Москва, 2016. - №3. - С. 27-30.

4. **Чекалов, Л.В.** Новые российские электрофильтры и модернизация действующих электрофильтров для повышения эффективности золоулавливания [Текст] /Л. В. Чекалов, В. А. Гузаев, М. Е. Смирнов, И. П. Верещагин, С. И. Хренов, К. А. Смагин, Е. М. Тимофеев. // Труды Международной научно-практической конференции «Уголь Эко – 2016» (Москва, 27-28 сентября 2016.). – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. - С.139-147.

5. **Гузаев, В.А.** Влияние долговечности механического оборудования на эффективность электрофильтров [Текст]/ В. А. Гузаев. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – Москва, 2014. - №7. - С. 29-31.

6. **Гузаев, В.А.** Состояние и перспективы повышения надёжности электрофильтров. Обзорная информация. Серия ХМ-14. Промышленная и санитарная очистка газов. [Текст] / В.А. Гузаев. - Москва, ЦИНТИхимнефтемаш,1991. - 24 с.

7. **Гузаев, В.А.** Основные направления повышения долговечности электрофильтров [Текст]/ В. А. Гузаев. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – Москва, 2013. - №11. - С. 46-48.