

Решение проблемы улавливания высокоомной золы электрофильтрами

- Чекалов Л. В., доктор техн. наук, АО “Кондор–Эко”, Ярославская обл., п. Семибратово
- Гузаев В. А.¹, канд. техн. наук, АО “Кондор–Эко”, Ярославская обл., п. Семибратово
- Смирнов М. Е., канд. техн. наук, АО “Кондор–Эко”, Ярославская обл., п. Семибратово

Для решения задач по снижению выбросов золы на угольных станциях созданы инновационные отечественные высокоэффективные электрофильтры типа ЭГАВ. Новые электрофильтры обеспечили в тех же габаритах корпуса повышение эффективности очистки до 99,87% и снижение выбросов до 16 раз при фактических выбросах от 12,6 до 119 мг/м³ (при нормальных условиях). Технические решения по интенсификации процесса электрической очистки, реализованные в электрофильтрах ЭГАВ, позволили повысить скорость дрейфа частиц к осадительному электроду до 65%. Применение новых электрофильтров типа ЭГАВ для решения проблемы очистки дымовых газов от высокоомной золы обеспечило требуемые выбросы при модернизации действующих электрофильтров. Стоимость реконструкции газоочистной установки с применением инновационных электрофильтров получается меньше, чем при использовании комбинированного электрофильтра или рукавного фильтра. Созданная новая технология электрической очистки стала научной основой инновационного развития перспективного газоочистного оборудования.

Ключевые слова: электрофильтр, высокоомная зола, скорость дрейфа, выбросы золы.

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 (НДТ)”.

Согласно ИТС НДТ 38-2017 [1], в России работают порядка 600 энергоблоков, использующих в качестве основного топлива уголь. Доля валовых выбросов угольных ТЭС за последние 10 – 15 лет снизилась всего лишь на 30%, что свидетельствует о необходимости реконструкции (до 95%) очистных сооружений ТЭС. При этом до 70% выбросов золы осуществляется крупными угольными станциями. Так, Рефтинская ГРЭС выбрасывает в год свыше 70 тыс. т высокоомной золы, что составляет около 12% всех выбросов ТЭС.

Диапазон фактических выбросов золы при сжигании твёрдого топлива (табл. 1) показывает, что для установок очистки дымовых газов, эксплуатируемых с 2001 г., фактический уровень выбросов золы составляет 150 – 400 мг/м³ (при нормальных условиях). Ещё более повышенный уровень выбросов разрешён для установок, введённых в эксплуатацию до 1981 и до 2000 гг. Это показывает, что действующие требования по выбросам (табл. 1) согласно ГОСТ Р 50831-95 [2] к работающим в настоящее время газоочистным

установками (ГОУ), используемым в теплоэнергетике, не обеспечиваются или обеспечиваются на предельном уровне.

По нормативам выбросов, в европейских странах действует Директива 2010/75/ЕС, которая обязывает обеспечить эффективность фильтрации на электрических станциях с остаточной запылённостью 10 – 20 мг/м³ (при нормальных условиях). Это ниже фактического уровня выбросов ТЭС в России до 10 раз и более.

Согласно рекомендациям ГОСТ Р 54204-2010 [3] по применению передовых технологий для обеспыливания уходящих газов на крупных ТЭС, сжигающих каменные и бурые угли, уровень выбросов пыли как для проектируемых предприятий, так и для действующих установлен в пределах 5 – 30 мг/м³ (при нормальных условиях), 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.

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, дос-

¹ Гузаев Виталий Александрович: guzaev@kondor-eco.com

таточной для удовлетворения требований НДТ и ГОСТ.

К настоящему времени отечественная технология электрической очистки ЭГАВ 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 [4 – 10]:

интенсификации процессов электрической очистки:

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

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

разработана технология пульсирующего коронного разряда в межэлектродном промежутке, позволяющая увеличить предельный заряд за счёт увеличения мгновенной напряжённости на фронте пульсаций объёмного заряда;

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

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 м;

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 (число полей и межэлектродных промежутков, высота электродов и межэлектродное расстояние), обеспечивающие максимальную долговечность аппарата [8];

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 [9, 10];

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

Т а б л и ц а 1

Фактический уровень и требования к выбросам золы на ТЭС России, рекомендации по применению передовых технологий очистки

Регламентирующий документ	Котлы тепловой мощностью, МВт		
	50 – 100	100 – 300	более 300
[1], диапазон фактических выбросов ($O_2 = 6\%$), mg/m^3 , ГОУ, введённых: до 1981 г. до 2000 г. с 2001 г.	1500 – 2000	1400 – 2000	1300 – 2000
	600 – 1300	400 – 1300	300 – 1400
	250 – 450	200 – 400	150 – 350
[2], требования к выбросам ГОУ, введённых до 31.12.2001 г. (с 01.01.2001 г.), mg/m^3	150 – 500 (150 – 250)	100 – 400 (50 – 150)	
[3], рекомендации по применению НДТ для обеспыливания уходящих газов на крупных ТЭС, сжигающих угли: уровень выбросов пыли на предприятиях, mg/m^3 : проектируемых действующих эффективность очистки на предприятиях, работающих на углях, %: каменных и бурых бурых, низкокалорийных	5 – 20	5 – 20	5 – 10
	5 – 30	5 – 25	5 – 20
	$\geq 99,5\%$ (электрофильтр), $\geq 99,95\%$ (рукавный фильтр) $\geq 99,95\%$ (электрофильтр), $\geq 99,99\%$ (рукавный фильтр)		

Примечания: 1. ГОУ – газоочистные установки. 2. Значения выбросов – при нормальных условиях.

расчётов обеспечивает работу электрофильтра на повышенных режимах электрического питания и долговечность механических конструкций.

Постоянное повышение технического уровня электрофильтров типа ЭГАВ позволило решать задачи по существенному снижению выбросов электрофильтров ТЭС. В табл. 2 представлены результаты испытаний по определению эффективности работы электрофильтров, выполненных по технологии ЭГАВ при реконструкции и новом строительстве ГОУ.

Анализ данных табл. 2 позволяет сделать следующие выводы:

достигнутая эффективность очистки дымовых газов в теплоэнергетике электрофильтрами, выполненными по технологии ЭГАВ, обеспечивает в тех же габаритах снижение выбросов от 7 до 16 раз по отношению к применяемым ранее технологиям;

эффективность очистки составляет от 99,52 до 99,87%, что находится в границах рекомендаций по применению НДТ (99,5% и выше);

предлагаемый тип электрофильтра обеспечивает выходную запылённость на уровне 12,6 мг/м³ (при нормальных условиях), что показывает возможность конструктивными решениями снижать влияние полуактивных зон;

уровень выбросов составляет от 12,6 до 119 мг/м³ (при нормальных условиях). Для обеспечения выбросов 5 – 30 мг/м³ предлагается дополнительно к технологиям электрической очистки увеличивать габариты аппарата. Положительный опыт разработки и внедрения электростатического золоуловителя для объёма дымовых газов более 2 000 000 м³/ч (табл. 2, поз. 6) позволяет решать и задачи увеличения активного объёма аппаратов.

Результаты проведённых исследований по повышению эффективности работы электрофильтров и практического их внедрения в промышленных газоочистных установках (табл. 2) позволили осуществить мероприятия по снижению выбросов золы с высоким, более 10⁸ Ом·м, удельным электрическим сопротивлением (УЭС). В теплоэнергетике зола с высоким УЭС образуется при сжигании экибастузского и кузнецкого углей.

Ранее решение проблемы очистки дымовых газов от угольной золы с высоким УЭС предлагали осуществлять путём увеличения времени пребывания газов в активной зоне электрофильтра [11]. Для этого высоту электродных систем предложено увеличить до 18 м, а число полей должно достигать от 5 до 7. Так, по результатам оценки информации, представленной в [11, табл. 3], увеличение времени пребывания в 1,39 раза приводит к снижению выбросов в 8 раз (с 400 до 50 мг/м³). С увеличением времени пребывания почти пропорционально увеличивается стоимость аппарата и его оборудования. Следовательно, предложенный конструктивный метод решения проблемы высокоэффективной очистки дымовых газов от высокоомной золы потребует существенного увеличения затрат и не всегда может быть реализован в условиях ограниченного пространства под электрофильтр как при реконструкции существующих ГОУ, так и при строительстве новых установок. К тому же стоимость такого электрофильтра в 1,38 раза выше стоимости комбинированного электрофильтра и в 1,23 раза выше стоимости рукавного фильтра [11, табл. 4].

В связи с этим, учитывая, что в пластинчатом электрофильтре эффективность очистки зависит как от времени пребывания газов, так и от скоро-

Таблица 2

Эффективность очистки газов в теплоэнергетике электрофильтрами типа ЭГАВ

№ п/п	Объект реконструкции или строительства	Межэлектродный промежуток, мм	Объём газа, м ³ /ч	КПД, % / остаточная запылённость, г/м ³		Снижение выбросов, разы
				до реконструкции	после реконструкции	
1	Омская ТЭЦ-5 (реконструкция в тех же габаритах)	350	612 000	97,9 / 1,47	99,83 / 0,119 (2009 г.)	12,35
2	Новосибирская ТЭЦ-4 (реконструкция с увеличением габаритов)	400	850 000	98,0 / 0,420	99,83 / 0,024 (2015 г.)	11,76
3	Краснокаменская ТЭЦ (реконструкция в тех же габаритах)	400	256 000	97,9 / 0,150	99,70 / 0,037 (2014 г.)	7,00
4	Красноярская ТЭЦ-4 (новое строительство)	460	340 000	99,56 / 0,05	99,7 / 0,041 (2012 г.)	1,47
5	Котельная “КрасМаш” (новое строительство)	400	520 000	98,7 / 0,052	99,52 / 0,0126 (2011 г.)	2,71
6	ТЭЦ “Вунг Анг”, Вьетнам (новое строительство)	400	2 120 000	99,68 / 0,120	99,87 / 0,087 (2014 г.)	2,46
7	Ново-Иркутская ТЭЦ (реконструкция в тех же габаритах)	400	808 000	97,9 / 0,378	99,87 / 0,022 (2015 г.)	16,15

Примечание. Значения остаточной запылённости – при нормальных условиях

сти дрейфа частиц по формуле (вариант формулы Дейча – Уайта [12]):

$$\eta = 1 - \exp(-wt_{\text{пр}}/h_0), \quad (1)$$

где η – эффективность очистки; w – скорость дрейфа частиц к осадительному электроду; $t_{\text{пр}}$ – время пребывания газов в активной зоне; h_0 – расстояние между коронирующим и осадительным электродами, дальнейшее повышение эффективности электрофильтра можно осуществить, интенсифицируя процесс электрической очистки, повышая скорость дрейфа.

В табл. 3 представлены основные технические решения для снижения выбросов при очистке дымовых газов ТЭС путём повышения скорости дрейфа в электрофильтре.

Анализ данных табл. 3 показывает, что новые (защищённые патентами Российской Федерации) технические решения по отдельным узлам и сборочным единицам электрофильтров позволяют снижать выбросы от 1,5 до 2,2 раза. К тому же увеличение активного объёма электрофильтра (табл. 3, поз. 5) позволяет дополнительно к техническим решениям по отдельным узлам обеспечить снижение выбросов от 1,9 до 2,6 раза, что необходимо для электрофильтров при улавливании золы с высоким удельным электрическим сопротивлением (табл. 4).

Анализ данных табл. 4 позволяет сделать следующие выводы:

достигнутая электрофильтрами типа ЭГАВ эффективность очистки дымовых газов от золы с по-

вышенным УЭС обеспечивает снижение выбросов до 12,35 раза по отношению к применяемым ранее электрофильтрам типа ЭГА (ЭГБ, ЭГБМ, ЭГБ1М и др.);

предлагаемый тип электрофильтра (ЭГАВ) позволил практически получить остаточную запылённость на уровне 24 мг/м³ для золы кузнецких углей и не более 150 мг/м³ (при нормальных условиях) для золы экибастузских углей;

электрофильтры типа ЭГАВ обеспечивают требования заказчиков по снижению выбросов при улавливании золы, образующейся при сжигании экибастузского и кузнецкого углей, даже при реконструкции действующих электрофильтров. Ещё больший эффект по снижению выбросов может быть получен в рамках разработки и нового строительства ГОУ.

По результатам промышленных испытаний электрофильтров (табл. 4, поз. 5) проведена оценка скорости дрейфа с использованием формулы (1) и выполнено сравнение этой скорости со скоростью дрейфа, рассчитанной по той же формуле с использованием данных [11, табл. 3]. Сравнение скоростей дрейфа показало, что за счёт интенсификации процессов электрической очистки (табл. 3) скорость дрейфа частиц к осадительному электроду увеличилась в 1,65 раза, что соизмеримо с уменьшением габаритов электрофильтров, предлагаемых по [11, табл. 3] для обеспечения требуемой остаточной запылённости при улавливании высокоомной золы, на эту же величину. Стоимость электрофильтра также соизмеримо

Т а б л и ц а 3

Основные технические решения по повышению эффективности электрофильтров ТЭС

№ п/п	Техническое решение	Реализация, патент, год внедрения технического решения	Параметры эффективности электрофильтра	
			увеличение скорости дрейфа, %	снижение выбросов, разы
1	Снижение напряжения зажигания коронного разряда	Выполнение элемента коронирующего электрода с минимальным радиусом кривизны, RU 2448779 [13], с 2012 г.	До 20	2,2
2	Повышение пробивного напряжения	Новая технология изготовления элементов осадительного электрода, исключаящая развал концов, RU 2377071 [14], с 2009 г.	До 10	1,5
		Оптимальное размещение элементов электродных систем с обеспечением минимального расстояния до плоской части профиля элемента осадительного электрода, RU 2655691 [15], с 2018 г.	До 10	1,5
3	Снижение полуактивных зон	Выполнение коронирующего электрода с минимальным числом мест стыковок отдельных рам по высоте, RU 2694661 [16], с 2019 г.	До 12,5	1,64
4	Пульсирующий режим питания электрофильтра	Для электрофильтров, улавливающих золу с высоким УЭС, с 2019 г.	До 10	1,5
5	Увеличение активного объёма электрофильтра “в плане” для улавливания золы с высоким УЭС	Внедрены конструкции с увеличением активной высоты электродов на 25% (с 12 до 15 м), RU 2377071 [14], с 2013 г.	–	2,6
		Внедрены конструкции с увеличением активной длины полей на 16,6% (с 3,84 до 4,48 м), RU 2211094 [17] с 2003 г. и RU 2694661 [16] с 2019 г.	–	1,9

снижается в 1,65 раза, и он становится дешевле комбинированного электрофильтра и рукавного фильтра [11, табл. 4]).

Предлагаемые конструктивные решения новых электрофильтров взаимозаменяемы с аппаратами типа ЭГА (ЭГБ, ЭГБМ, ЭГБ1М) разработки до 2001 г. При этом для получения необходимой остаточной запылённости не потребуется дополнительной площади “в плане”, а высота электродных систем может быть ограничена 12 – 15 м.

Проведённый опыт реконструкции действующих электрофильтров как с наращиванием высоты аппарата, так и с разработкой нового корпуса на месте двух прежних 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. Следовательно, при внедрении новых электрофильтров требуется проводить тщательный анализ процессов, обеспечивающих эффективную очистку в электрофильтре, на уровне газоочистной установки в целом.

Таким образом, 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 новыми электрофильтрами сохраняются существующие корпуса (при необходимости с уве-

личением высоты и уточнением газораспределения) и фундаменты (при необходимости с усилением), а капитальные затраты на реконструкцию существенно меньше, чем с применением комбинированного электрофильтра или рукавного фильтра.

Положительные результаты применения новой технологии электрической очистки, реализованной в электрофильтрах типа ЭГАВ, стали научной основой для создания новых способов очистки (RU 2619701 [18]) и нового перспективного класса газоочистного оборудования. Так, для очистки газов от трудно улавливаемой в электрофильтрах пыли, была разработана конструкция комбинированного электрофильтра (или гибридного фильтра), состоящего из двух ступеней очистки: первая – электрофильтр в объёме одного поля с эффективностью очистки до 90%, и вторая – рукавный фильтр также в объёме одного поля электрофильтра. В результате получается синергетический эффект от слияния двух технологий очистки и промышленный аппарат с высокой эффективностью очистки становится компактным и низко затратным при эксплуатации (RU 2419478 [19]). Дополнительно к этому, на основе развития технологии электрической очистки появились перспективы и проведена научно-исследовательская работа по созданию комплексного воздухоочистительного устройства для очистки воздуха газотурбинных установок на базе электрофильтра (RU 2644004 [20] и RU 2651391 [21]) вместо фильтров тонкой очистки. Преимущества такого технического решения заключаются в уменьшении текущих затрат вследствие снижения гидравлического сопротивления, в повышении эффективности очистки воз-

Т а б л и ц а 4

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

№ п/п	ТЭС	Котёл		H ₀ , мм	Проектный объём газа на один электрофильтр м ³ /ч (температура газа, °С)	КПД, % / остаточная запылённость, г/м ³		Снижение выбросов, разы	
		Мощность, МВт	Уголь			до реконструкции (по проекту)	максимальный результат после реконструкции (год испытания)	после реконструкции	по проекту
1	Омская ТЭЦ-5 (блок ст. № 3)	150	Экибастузский	350	419 000 (137,0)	97,9 / 1,47 (99,5 / 0,350)	99,83 / 0,119 (2009 г.)	12,35	2,94
2	Новосибирская ТЭЦ-4 (блок ст. № 11)	300	Кузнецкий	400	510 000 (148,5)	98,0 / 0,420 (99,76 / 0,05)	99,83 / 0,024 (2015 г.)	11,76	2,1
3	ТЭЦ “Вунг Анг”, Вьетнам	660	По характеристикам близок к кузнецкому	400	1 056 000 (137,0)	Новое строительство (99,68 / 0,120)	99,87 / 0,087 (2014 г.)	Новое строительство	2,46
4	Рефтинская ГРЭС (блок ст. № 1)	300	Экибастузский	400	349 200 (до 150)	97,80 / 1,200 (99,59 / 0,250)	99,62 / 0,234 (2018 г.)	5,79	1,07
5	Рефтинская ГРЭС (блок ст. № 9)	500	Экибастузский	400	Проект – 941 000 (до 190), факт – 1 174 560 (167,1)	98,60 / 0,854 (99,75 / 0,150)	99,79 / 0,135 (2018 г.)	6,67	1,11

духа, надёжности при эксплуатации и, как следствие, снижаются потери эффективности турбины, выработки электроэнергии и мощности ГТУ.

Выводы

1. Отмечено, что решение задач по снижению выбросов золы при работе угольных станций до 10 раз и более возможно при использовании отечественных высокоэффективных электрофильтров типа ЭГАВ, разработанных на основе проведённого комплекса научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.

2. Установлено, что по результатам промышленного внедрения в теплоэнергетике электрофильтров типа ЭГАВ при реконструкции и новом строительстве ГОУ, достигнуто снижение выбросов в тех же габаритах корпуса до 16 раз. При этом эффективность очистки обеспечивается на уровне 99,52 – 99,87%, а выбросы составили от 12,6 до 119 мг/м³ (при нормальных условиях), что удовлетворяет требованиям НДТ и ГОСТ, а при увеличении габаритов электрофильтра возможно стабильное достижение европейского уровня (≤ 20 мг/м³).

3. Выявлено, что технические решения по интенсификации процесса электрической очистки, реализованные в электрофильтрах ЭГАВ, позволили повысить скорость дрейфа частиц к осадительному электроду до 65%.

4. Доказаны преимущества применения нового электрофильтра типа ЭГАВ для решения проблемы очистки дымовых газов от высокоомной золы – он обеспечивает требуемую эффективность очистки при реконструкции действующих ГОУ. При этом стоимость электрофильтра получается меньше, чем при использовании комбинированного электрофильтра или рукавного фильтра.

5. Показано, что созданная новая технология электрической очистки стала научной основой инновационного развития газоочистного оборудования.

Список литературы

1. *Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии* [Текст]: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС НТД 38-2017. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 280 с.
2. *Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования* [Текст]: ГОСТ Р 50831-95. – Введ. 1997-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 27 с.
3. *Ресурсосбережение. Каменные и бурые угли. Наилучшие доступные технологии сжигания* [Текст]: ГОСТ Р 54204-2010. – Введ. 2012-01-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 39 с.
4. *Чекалов, Л. В. Научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения* [Текст]: автореф. дис. ... д-р техн. наук / Чекалов Л. В. – Москва, 2007. – 40 с.
5. *Чекалов, Л. В. Анализ работы электрофильтров при высокой концентрации мелкодисперсной фазы* [Текст] / Л. В. Чекалов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 3. – С. 27 – 30.
6. *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 // Тр. Международной научно-практической конференции “Уголь Эко – 2016” (Москва, 27 – 28 сентября 2016). – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – С. 139 – 147.
7. *Чекалов, Л. В. Новое поколение электрофильтров и решение проблемы улавливания высокоомной золы* [Текст] / Л. В. Чекалов, М. Е. Смирнов, В. А. Гузаев // Сб. докладов Международной научно-практической конференции “Экология в энергетике”. – М.: ОАО “ВТИ”, 2019. – С. 50 – 56.
8. *Гузаев, В. А. Влияние долговечности механического оборудования на эффективность электрофильтров* [Текст] / В. А. Гузаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 7. – С. 29 – 31.
9. *Гузаев, В. А. Состояние и перспективы повышения надёжности электрофильтров. Обзорная информация. Серия ХМ-14. Промышленная и санитарная очистка газов.* [Текст] / В. А. Гузаев. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. – 24 с.
10. *Гузаев, В. А. Основные направления повышения долговечности электрофильтров* [Текст] / В. А. Гузаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 11. – С. 46 – 48.
11. *Верещагин, И. П. Очистка дымовых газов от угольной золы с высоким удельным электрическим сопротивлением* [Текст] / И. П. Верещагин, П. С. Платонов, Г. И. Субботина [и др.] // Электрические станции. – 2010. – № 10 – С. 28 – 33.
12. *Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов* [Текст] / Под ред. Чекалова Л. В. – Ярославль: Русь, 2004. – 424 с.
13. *Пат. 2448779 Рос. Федерация. Коронирующий электрод* [Текст] / Чекалов Л. В., Смирнов М. Е., Санаев Ю. И.; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12.
14. *Пат. 2377071 Рос. Федерация. Способ изготовления элементов осадительных электродов для электрофильтра* [Текст] / Чекалов Л. В., Шапошник С. А.; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36.
15. *Пат. 2655691 Рос. Федерация. Электрофильтр* [Текст] / Чекалов Л. В., Гузаев В. А., Копансков М. А.; опубл. 29.05.2018, Бюл. № 16.
16. *Пат. 2694661 Рос. Федерация. Электрофильтр* [Текст] / Чекалов Л. В., Гузаев В. А., Смирнов М. Е.; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20.
17. *Пат. 2211094 Рос. Федерация. Электрофильтр* [Текст] / Чекалов Л. В., Гузаев В. А.; опубл. 27.08.2003, Бюл. № 24.
18. *Пат. 2619701 Рос. Федерация. Способ очистки газов* [Текст] / Чекалов Л. В., Гузаев В. А.; опубл. 17.05.2017, Бюл. № 14.
19. *Пат. 2419478 Рос. Федерация. Комбинированный электрофильтр* [Текст] / Чекалов Л. В., Санаев Ю. И.; опубл. 27.05.2011, Бюл. № 15.
20. *Пат. 2644004 Рос. Федерация. Воздухоочистительное устройство газотурбинной установки* [Текст] / Чекалов Л. В.; опубл. 06.02.2018, Бюл. № 4.
21. *Пат. 2651391 Рос. Федерация. Устройство подготовки воздуха для газотурбинной установки* [Текст] / Чекалов Л. В., Санаев Ю. И., Гузаев В. А.; опубл. 19.04.2018, Бюл. № 11.