

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВ В КЕРАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРАХ

Докт. техн. наук Б. Л. Красный, канд. техн. наук А. Б. Красный,
канд. техн. наук Д. А. Серебрянский
ООО «НТЦ «Бакор» (г. Москва, Россия)

Последние 20 лет получили распространение комплексные системы очистки газов с керамическими волокнистыми высокотемпературными фильтрующими элементами и установками на их основе. В таких установках можно проводить очистку газов без охлаждения не только от взвешенных частиц пыли, но и от вредных газов, таких как CO , NO_x , SO_2 , HF , HCl , ЛОС, ПХДД/ПХДФ, бенз(а)пирена. Однако в открытой печати отсутствуют данные о характеристиках работы таких фильтрующих элементов, как прочность, проницаемость, стойкость к влажным и агрессивным газам, а также об эффективности очистки газов в фильтровальных установках с волокнистыми керамическими фильтрующими элементами. В данной статье приведены результаты исследований, практической работы, технические характеристики, экономические и экологические аспекты применения керамических фильтров в различных отраслях промышленности, в том числе черной, цветной металлургии, в производстве теплоизоляционных материалов стекла.

Ключевые слова: высокотемпературная очистка газов, фильтр газовый волокнистый керамический (ФГВК), фильтровальная установка на основе керамических фильтрующих элементов (ФКИ), катализ, комплексная очистка газов, теплообменный аппарат, камера дожигания газов, рукавный фильтр.

Фильтровальные установки на основе волокнистых высокотемпературных керамических фильтрующих элементов (ФГВК) появились 25 лет назад. В США разработкой и внедрением занималась компания Madison Filters, в России с 2000 г. ООО НТЦ «Бакор». Основное преимущество ФГВК относительно фильтрующих элементов для очистки высокотемпературных газов предыдущего поколения, основанных на зернистых материалах — это возможность их изготовления для очистки больших объемов очищаемых газов (более 1 млн $\text{м}^3/\text{ч}$). Площадь фильтрации одного фильтрующего элемента ФГВК — до 2,64 м^2 , наружный диаметр 150 мм, а длина до 6000 мм. Широкое распространение фильтровальных установок на основе ФГВК в различных отраслях промышленности требует определения таких технических характеристик, как прочность, проницаемость, стойкость к влажным и агрессивным газам, эффективность очистки.

ФГВК основаны на алюмосиликатных волокнах. Химический состав волокон: Al_2O_3 — 44 %, SiO_2 — 56 %. На рис. 1 приведен общий вид фильтрующих элементов (а) гибких с проволочным каркасом, применяемых в типовых рукавных фильтрах, и керамических волокнистых (б).

Гибкие фильтрующие элементы, получившие распространение для фильтрации газов, имеют широкую номенклатуру типов применяемых материалов, однако максимальная температура, например для материала иностранного производства Nomex, составляет 200 °С, а для стеклотканых рукавов — 250 °С. Стоит отметить, что в процессе импульсной регенерации происходит механическое взаимодействие рукава и металлического каркаса, которое истирает рукав. Срок службы стеклотканых фильтрующих элементов обычно не превышает одного года.

Керамические волокнистые фильтрующие элементы изготавливаются в виде полой свечи, у которой с одной стороны фланец, а с другой эллиптическое дно.

Конструкция ФГВК — самонесущая [1 — 5]. Наружный диаметр 60 или 150 мм и длина от 1000 до 6000 мм, толщина стенки 10 — 20 мм. Элементы длиной более 3000 мм изготавливают из двух сегментов. Сегменты соединяют между собой различными способами: фланцевым соединением, резьбой, изготовленной в теле фильтрующего элемента, специальной металлической вставкой — соединителем в зависимости от условий применения. Пористость ФГВК — 90 %, плотность материала 0,3–0,35 $\text{г}/\text{см}^3$. В керамических фильтрующих элементах можно проводить очистку газов с температурой до 1000°. Однако на практике применения ФГВК температура очищаемого газа ограничена свойствами конструкционных металлов, из которых изготавливают фильтровальные установки, в которых устанавливают ФГВК, и в большинстве случаев — до 500 °С. В Германии разработан стандарт на высокотемпературные фильтры [6].

ФГВК должен обеспечивать воздухопроницаемость, позволяющую применять в системах газоочистки стандартные тягодутьевые машины среднего и высокого давления, при этом иметь достаточную прочность. Измерения прочности образцов ФГВК, изготовленных в НТЦ Бакор, проводили двумя методами разрушающего контроля: сжатие О-образного, С-образного кольца и на разрыв галтели. Измерения проводили по методике [7]. Результаты испытаний на прочность образцов ФГВК НТЦ Бакор сравнивались с данными, приведенными в [8]. Общий вид экспериментальных установок приведен на рис. 2.

Анализируя экспериментальные данные, приведенные в табл. 1, можно сделать вывод, что прочность образцов волокнистых газовых фильтров ФГВК в 1,7 раза выше при тесте на диаметрально сжатие и в 2,7 раза выше при тесте на растяжение по сравнению с образцом иностранного производства согласно данным [8].

Таблица 1. Сравнительные результаты испытаний на прочность образцов волокнистых газовых фильтров производства «НТЦ Бакор» и образцов иностранного производства

Параметр	Единица измерения	Прочность на диаметральное сжатие	Прочность на разрыв
Фильтр ФГВК производства НТЦ Бакор	МПа	0,68	0,71
Фильтр иностранного производства [8]	МПа	0,40	0,26

Промышленные испытания ФГВК 150/110-3000 (длина фильтрующих элементов 3000 мм) были проведены на горно-обогатительном комбинате предприятия черной металлургии в системе аспирации загрузки железорудных окатышей в железнодорожные вагоны в 2022 г. Пилотная экспериментальная установка ФКИ 5,3 была подключена на байпасе существующей газоочистки. Установка находилась в круглосуточной эксплуатации 30 дней. Прочность волокнистых керамических газовых фильтров до и после проведения испытаний в промышленных условиях отличается не более чем на 1 %, что находится в пределах погрешности метода измерений.

Комбинированные испытания ФГВК 150/110-4000 с фланцевым соединением сегментов начаты с октября 2023 г. и продолжаются до сих пор в режиме опытной эксплуатации на металлургическом комбинате в системе беспылевой выдачи кокса (рис. 3).

Стоит отметить, что фильтровальная установка находится на железнодорожном ходу и с ускорением перемещается относительно коксохимической батареи, подвергая непрерывному механическому воздействию керамические фильтрующие элементы. Механические воздействия преимущественно связаны с изгибающими нагрузками и вибрацией. Кроме того, на керамические фильтрующие элементы попадает газопылевой поток с резкими перепадами температуры от -30 до $+600$ °С. Срок службы керамических фильтрующих элементов в данных условиях обычно составляет 1,5-2 года.

Воздухопроницаемость ФГВК при их производстве определяется в соответствии с методикой [9] а в промышленных условиях в соответствии с [10, 11]. На рис. 4 приведена зависимость аэродинамического сопротивления керамических фильтрующих элементов от удельной газовой нагрузки при нормальных условиях на незапыленном потоке.

В рабочих условиях аэродинамическое сопротивление фильтрованию при очистке газов от твердых частиц пыли складывается из сопротивления фильтровальной перегородки (ΔP_1) и сопротивления слоя пыли (ΔP_2), а также вязкости газов μ , концентрации твердых частиц Z_1 , удельной газовой нагрузки q :

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = \mu q (A + B \cdot M_1), \quad (1)$$

где $M_1 = Z_1 \cdot q \cdot \tau$.

Экспериментальное определение фильтровальных констант A и B в результате проведения полупромышленных испытаний пилотных установок ФКИ в условиях действующих производств позволяют определять целесообразную удельную газовую нагрузку и дли-

тельность фильтровального цикла (время между импульсными регенерациями) по зависимости:

$$t_{\Phi} = \frac{(\Delta P_{\Phi} / \mu \vartheta_{\Phi}) - A}{B \vartheta_{\Phi} Z}, \quad (2)$$

где ϑ_{Φ} — скорость фильтрации.

Результаты расчета длительности фильтровального цикла, рассчитанного по зависимости (2) на основе экспериментально установленных констант фильтрации $A = 20 \cdot 10^9$ 1/м, $B = 50 \cdot 10^9$ м/кг при полупромышленных испытаниях ФКИ 5,3 в системе аспирации загрузки железорудных окатышей в железнодорожные вагоны, приведены на рис. 5. (данные табл. 1). По данным, приведенным на рис. 5, выбирают целесообразную удельную газовую нагрузку и длительность фильтроцикла, рассчитывают расход сжатого воздуха на импульсную регенерацию.

Результаты испытаний пилотных установок на основе ФГВК, подключенных на байпасе к существующим газоочистным установкам в условиях действующих производств в интервале температур от 40 до 120 °С, приведены в табл. 1, в интервале температур от 200 до 400 °С приведены в табл. 3. Данные, приведенные в табл. 1 и 3, свидетельствуют о возможности применения в системах очистки газов с керамическими фильтрами стандартных тягодутьевых машин среднего и высокого давления в зависимости от количества аппаратов в системе, а также протяженности газопроводов.

Испытания образцов ФГВК на эффективность очистки от твердых частиц в соответствии с VDI 3926 с использованием тестовых аэрозолей проводились в специализированной лаборатории. Испытательная установка состояла из генератора частиц, разбавителя, испытательной камеры, дифференциального манометра и счетчика частиц AeroTrak 9306-V2. На рис. 6. приведены результаты тестовых испытаний образцов ФГВК при очистке потока от частиц с медианным диаметром 0,6 мкм.

Результаты испытаний, приведенные на рис. 6, позволяют классифицировать керамические волокнистые фильтрующие элементы как класс фильтрации Н10 (высокоэффективный фильтр) в соответствии с ГОСТ Р 51251–99.

Промышленные испытания пилотной установки ФКИ 9,8 с ФГВК в условиях действующего производства по определению эффективности очистки проводились на байпасе системы газоочистки конвертерной печи плавки ломов вторичной меди, бронзы и шлаков камерных печей. Медианный диаметр частиц, поступающих на очистку, составлял 1,1 мкм. Температура очищаемых газов на входе в ФКИ 9,8 в период испы-



Рис. 1. Общий вид фильтрующих элементов: а – гибкий фильтрующий элемент на металлическом каркасе применяется в рукавных фильтрах; б – жесткий керамический волокнистый фильтрующий элемент ФГВК применяется в ФКИ

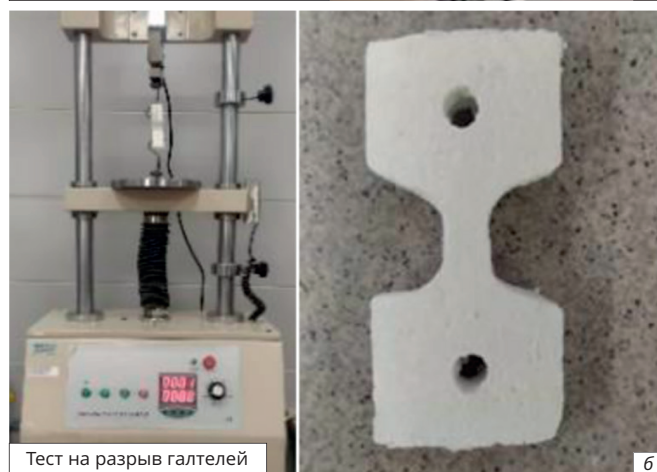


Рис. 2. Фото экспериментальных установок по определению прочности волокнистых газовых фильтров

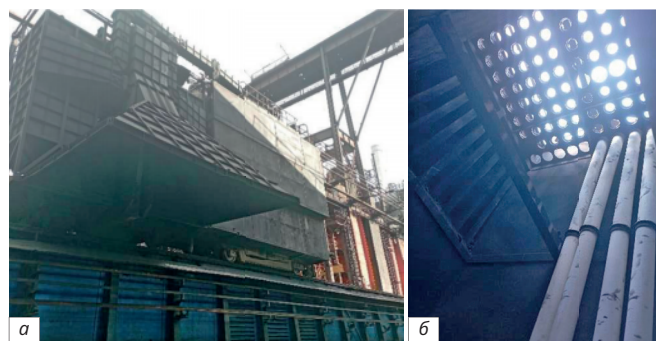


Рис. 3. Установка беспылевой выдачи кокса на металлургическом комбинате (а); вид камеры «грязного» газа с ФГВК 150/110-4000 (б)

таний была 195 °С, удельная газовая нагрузка – 70 м³/(м² · ч), начальная концентрация твердых частиц 360 мг/м³, конечная концентрация после очистки газов в ФГВК составила 1 мг/м³.

Подобные результаты по конечной запыленности также были достигнуты в системе сепарации высокотемпературных продуктов пиролиза на плазмотронной установке получения водорода и сажи с медианым диаметром 0,4 мкм из углеводородного топлива в АО ГНЦ «Центр Келдыша». Предварительные испытания показали целесообразность применения в данной системе зернистых керамических фильтрующих элементов вместо волокнистых.

В период с 2021 по 2024 г. были проведены полупромышленные испытания фильтровальных установок на основе ФГВК в различных отраслях промышленности: черной и цветной металлургии, на горно-обогатительных предприятиях, предприятиях по производству минеральной изоляции, предприятиях по термическому обезвреживанию отходов и др. Результаты по эффективности очистки газов от взвешенных частиц приведены в табл. 1 и 3, из которых видно, что во всех приведенных случаях остаточная концентрация после керамического фильтра не превышает 10 мг/нм³.

После проведения каждого испытания в промышленных условиях образцы керамических фильтрующих элементов ФГВК подвергаются анализу с применением микроскопа. На рис. 7 приведена микрофотография торцевого среза керамического волокнистого фильтрующего элемента после одного месяца эксплуатации. На рисунке видно, что глубина проникновения твердых частиц в тело фильтрующего элемента не превышает 2 мм при толщине стенки фильтрующего элемента 20 мм.

Влияние влажности очищаемого потока на аэродинамическое сопротивление ФГВК, а также на работоспособность ФКИ 5,3 определялось в условиях действующего производства горно-обогатительного комбината в системе аспирации загрузки железнодорожных вагонов. Температура загружаемых в железнодорожные вагоны окатышей превышает 100 °С, вследствие этого аспирируемый воздух нагревается в летнее время до 40 °С. Испытания проводились в летнее время, поэтому в некоторые периоды испытаний в систему аспирации попадали атмосферные осадки, приводящие к выпадению влаги в бункере-накопителе ФКИ 5,3 (рис. 8, б). В зимнее время эксплуатации данной аспирационной установки рукавный фильтр большую часть времени работает в точке росы (рис. 8, а). Стоит отметить, что в данных испытаниях применялся ФГВК с гидрофобизирующей пропиткой.

В период испытаний относительная влажность пылегазового потока на входе в ФКИ 5,3 варьировалась от 25 до 100 %. Поэтому при анализе классифицировали три типа данных относительной влажности аспирационного потока: ненасыщенный – до 100 %, насыщенный – 100 % и пересыщенный – более 100 % с выпадением капельной влаги [12]. Испыта-

Таблица 2. Результаты полупромышленных испытаний фильтра керамического импульсного ФКИ

№ п/п	Параметр	Ед. изм.	ЖРК окатыши	Апатит	ЖРК Сушка	ЖРК Обжиг
1	Среднее время фильтроцикла	мин	18-30	20	60	174
2	Температура очищаемого газа	°С	40	120	70	100
3	Медианный диаметр частиц пыли	мкм	15	5	10,6	7,4
4	Удельная газовая нагрузка	м ³ /(м ² · ч)	75	60-75	60-75	60-80
5	Начальное Δр (после регенерации)	Па	1280	2000	900	900
6	Предельное Δр (перед регенерацией)	Па	1500	2600	1500	1500
7	Концентрация пыли на входе	г/нм ³	5,0	7,2	1	1,124
8	Концентрация пыли на выходе	мг/нм ³	4	9	8	7
9	Эффективность очистки	%	99,92	99,1	99,2	99,4

Таблица 3. Время цикла работы фильтра между импульсной регенерацией при разной влажности аспирируемого потока

Относительная влажность, %	50 (ненасыщенный)	100 (насыщенный)	>100 с выпадением влаги (пересыщенный)
Длительность фильтроцикла, мин	36	22	12
Остаточное сопротивление, Па	730	970	1075
Абсолютная влажность, кг/м ³	0,0249	0,0377	0,1028

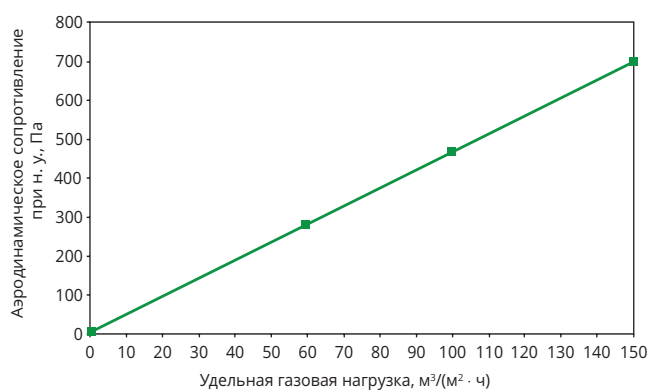


Рис. 4. Зависимость аэродинамического сопротивления от удельной газовой нагрузки ФГВК при н. у.

ния ФКИ проводились при удельной газовой нагрузке 70 м³/(м² · ч), температуре газопылевого потока +30 °С, начальной запыленности 6,5 г/м³. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Из приведенных в табл. 3 данных видно, что остаточное сопротивление растет с увеличением содержания влажности в потоке, что приводит к сокращению длительности фильтроцикла. Данные результаты можно объяснить заполнением пор керамического фильтрующего элемента водой. Вместе с тем стоит отметить, что ФГВК при работе с пересыщенным потоком, а также выпадением из него влаги работал стабильно, выполняя свои функции по очистке газового потока и обеспечивая остаточную концентрацию твердых частиц на выходе не более 4 мг/м³ [13].

Исследования стойкости ФГВК к высокотемпературным условиям агрессивных сред проводились в условиях действующего производства на нефтеперерабатывающем предприятии в установке регенерации отработанной серной кислоты, в которой в качестве топливного газа используется отходящий сероводо-

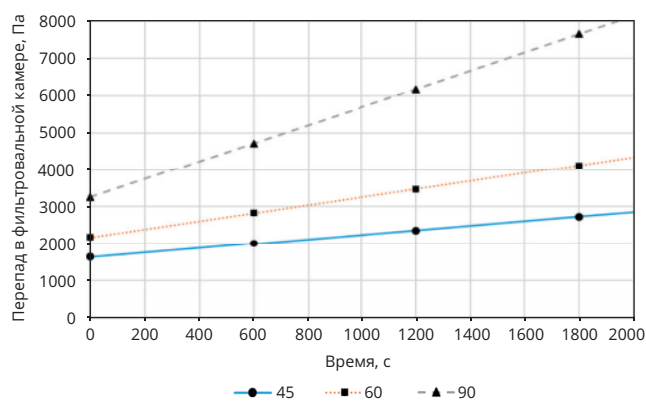


Рис. 5. Зависимость аэродинамического сопротивления фильтра керамического импульсного ФКИ от удельной газовой нагрузки и длительности фильтровального цикла: 45/60/90 – удельная газовая нагрузка на фильтр, м³/(м² · ч)

род. После котла-утилизатора температура отходящих газов составляет 500 °С, а содержание SO₂ в отходящих газах от 25 до 30 %. Очистка газов от взвешенных веществ осуществляется в шести параллельно установленных фильтровальных установках ФКИ, в каждой из которых находится по 256 фильтрующих элементов. Система работает в течение года без остановки. Фильтровальные установки оборудованы импульсной системой регенерации сжатым воздухом. Опытная эксплуатация ФГВК, изготовленных в НТЦ Бакор, проводилась в течение года. В мае 2024 г. при плановом регламентном останове данной установки было определено, что все используемые ФГВК работоспособны и могут продолжить следующий цикл эксплуатации в течение года. С октября 2023 г. в опытной эксплуатации на одном из предприятий по выработке синтез-газа из отходов находятся в эксплуатации ФГВК для обеспыливания отходящих газов при температуре 350 °С. Отходящий синтез-газ содержит СО – 19,7 %,

Таблица 4. Результаты полупромышленных испытаний комплексных систем очистки газов на основе ФКИ

№ п/п	Установка. Процесс	Ед. изм.	Эффективность очистки и остаточная концентрация вредных веществ.						
			пыль	SO ₂	HF	HCl	CO	ЛОС	ПХДД.Ф _{нг} I-TEQ/Нм ³
1	УТО 100 К Термическое обезвреживание отходов в установке (<i>t_r</i> = 350 °С, Δ <i>P</i> = 2600 Па, <i>q</i> = 70 м ³ /м ² · ч, (<i>d</i> ₅₀ = 12 мкм)	% мг/Нм ³	99,8 10	84 10	85,7 0,03	79,6 2	95,8 43	88 0,9	90,5 0,001
2	ФКИ 9,8 Кат. Печь плавки вторичной меди. (<i>t_r</i> = 350 °С, Δ <i>P</i> = 1700 Па, τ = 0, 25 раз/ч, <i>q</i> = 52 м ³ /м ² · ч, <i>d</i> ₅₀ = 6,5 мкм)	% мг/Нм ³	99,1 5			88 2	95 0,03		92 1*10 ⁹
3	ФКИ 0,02 Кат. Камерная печь плавки вторичного алюминия (<i>t_r</i> = 400 °С, Δ <i>P</i> = 2800 Па, <i>q</i> = 65 м ³ /м ² · ч, <i>d</i> ₅₀ = 10 мкм)	% мг/Нм ³	99,91 1,1	99,73 1,63	99,5 0,01	98,8 16	81,9 68,5	90,3	90,5 0,0002
4	ФКИ 0,02 Кат. Роторная печь плавки вторичного алюминия (<i>t_r</i> = 450 °С, Δ <i>P</i> = 2500 Па, <i>q</i> = 60 м ³ /м ² · ч, <i>d</i> ₅₀ = 22 мкм)	% мг/Нм ³	99,8 10,4	99,99 0,01	94,5 0,48	98,53 4,84	90,56		
5	ФКИ 0,02 Кат. Вельп печь производства цинка (<i>t_r</i> = 380 °С, Δ <i>P</i> = 2500 Па, <i>q</i> = 30 м ³ /м ² · ч)	% мг/Нм ³	99,95 7		83 0,678	88 6	88,5 270	84,4 64	
6	УТО 100 К Ваграночная печь производства теплоизоляции (с камерой дожигания) (<i>t_r</i> = 311 °С, Δ <i>P</i> = 2400 Па, <i>q</i> = 70 м ³ /м ² · ч, <i>d</i> ₅₀ = 15 мкм)	% мг/Нм ³	99,9 10	100 7			99,99 8		
7	ФКИ 0,02 Кат. Установка термического обезвреживания СОЖ	% мг/Нм ³	99,3 4	98,8 5					

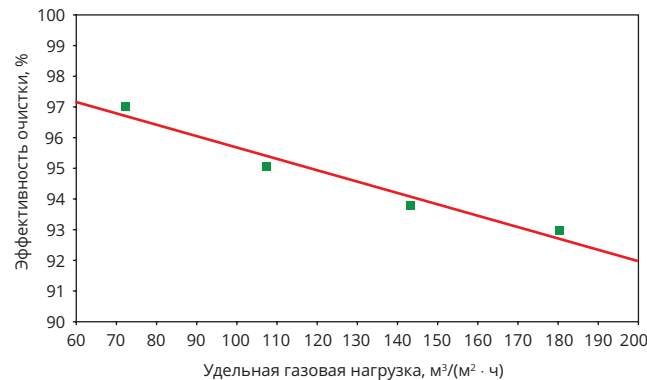


Рис. 6. Зависимость эффективности очистки газов от частиц медианного диаметра 0,6 мкм от удельной газовой нагрузки

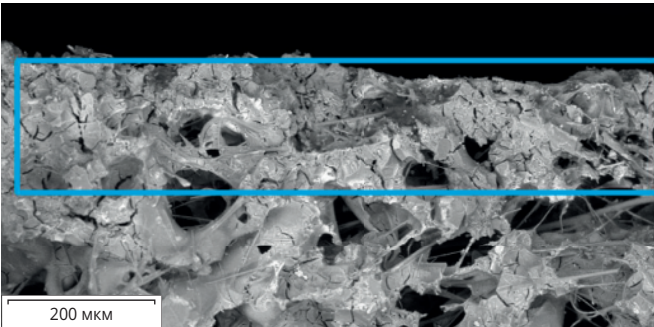


Рис. 7. Микрофотография торцевого среза керамического волокнистого фильтрующего элемента

N₂ – 16,6 %. Качество синтез-газа в ФГВК позволяет направлять его в двигатели внутреннего сгорания либо другие установки для выработки тепловой или электрической энергии.

В настоящее время в черной металлургии получили распространение установки вакуумирования жидкой стали на основе механических вакуумных насосов. Такие установки по сравнению с пароежекторными насосами более маневренны и менее энергозатратны в эксплуатации. Однако надежность и долговечность

механических вакуумных насосов зависят от наличия пыли в вакуумной системе, в связи с этим подобные установки оснащают системами пылеулавливания. Как правило, пыль установок вакуумирования содержит Mg, который активно окисляется при натекании воздуха в систему между дегазациями стали, что приводит к возгоранию рукавов рукавных фильтров, установленных перед вакуумными насосами. В 2021 г. на одном из металлургических предприятий РФ были проведены полупромышленные испытания керамического фильтра при низких давлениях (абсолютное давление 10 Па) в рабочих условиях действующей установки вакуумирования жидкой стали. Была изготовлена специальная фильтрационная ячейка, в которую помещали керамический фильтрующий элемент диаметром 60 мм и длиной 125 мм. Фильтрационная ячейка присоединялась к газоходу перед существующим фильтром и подключалась к вакуумному насосу. По привесам пыли, собранной на поверхности фильтрующего элемента, и на фильтре АФА, который был установлен за керамическим фильтром, а также по перепаду давления были определены расход потока и концентрация взвешенных частиц. Так, концентрация твердых частиц на входе в фильтровальную ячейку составила 2,2 г/Нм³, концентрация твердых частиц за керамическим фильтрующим элементом составила 3,25 мг/Нм³, при этом эффективность очистки составила 99,86 %. Стоит отметить, что возгорание пыли на поверхности керамических фильтрующих элементов не приведет к нарушению их целостности и снижению пропускной способности.

Совмещение очистки газов от твердых частиц с очисткой от вредных газов, таких как NO_x, CO, SO₂, HF, HCl, ЛОС, ПХДД/Ф, возможно в фильтровальных установках на основе керамических фильтрующих элементов путем их каталитической активации. С 2020 г. в НТЦ Бакор совместно с Институтом катализа СО РАН проводится совместная работа по исследованию

Таблица 5. Сравнительные показатели систем очистки газов на основе рукавных и керамических фильтров

№ п/п	Параметр	Единица измерения	ГО с рукавным фильтром	ГО с керамическим фильтром
1	Расход газов перед фильтром (в раб. условиях)	м ³ /ч	70039	15994
2	Расход за системой газоочистки (в раб. условиях)	м ³ /ч	64116	9340
3	Потребная площадь фильтрации	м ²	1167	267
4	Аэродинамическое сопротивление системы газоочистки	Па	5000	8000
5	Потребная мощность на валу электродвигателя дымососа	кВт	232	79
6	Тепловая энергия, получаемая от теплообменных аппаратов	Гкал/ч		4,8
Капитальные затраты на системы газоочистки				
7	Цена комплекта оборудования с комплектами фильтрующих элементов и затрат на строй монтажные работы.	млн руб.	63	30
Операционные затраты на системы газоочистки				
8	Затраты на электрическую энергию на дымосос	млн руб/год	9,3	3,2
9	Затраты на электрическую энергию на импульсную регенерацию	млн руб/год	0,5	0,3
10	Затраты на ремонт оборудования	млн руб/год	2,1	1
11	Срок службы сменных фильтрующих элементов	год	2	2
12	Затраты на фильтрующие элементы	млн руб/год	3,8	1,1
13	Общие расходы	млн руб/год	13,8	5,4
14	Индикативная цена очистки газов (капитальные + операционные расходы) за 20 лет эксплуатации на расход 1 нм ³ /ч	руб/(нм ³ /ч)	57828	21660



Рис. 8. Вагоны после отгрузки железорудных окатышей (а); камера неочищенного газа ФКИ 5,3 во время аспирации воздуха с капельной влагой (б)

и испытаниям каталитически-активных фильтрующих элементов. Разработаны две окислительные композиции на основе $MgCr_2O_4$ и одна восстановительная на основе $V_2O_5-MoO_3-WO_3$ для восстановления окислов азота до элементарного азота и паров воды [14 – 17]. Промышленные испытания комплексной очистки газов от пыли и вредных газов в керамических фильтрующих элементах с каталитической активацией проводились на экспериментальных установках собственного производства ФКИ 9,8 и УТО-100 К. Результаты данной работы приведены в табл. 4.

Продукты горения термического обезвреживания отходов содержат 14 маркерных веществ, имеющих нормативные показатели, регламентированные ИТС НДТ 9-2020 [18 – 20]. В рамках проведения исследований по эффективности очистки продуктов горения

от маркерных веществ, образуемых при термическом обезвреживании отходов, а также государственной экологической экспертизы испытания проводили в г. Череповец в 2022 г. Проведение данных испытаний сопровождалось термическим обезвреживанием 15 групп отходов, среди которых резинотехнические изделия, пластик, медицинские и твердые коммунальные отходы. В пилотной установке в период испытаний сжигалось до 50 кг/ч отходов. На рис. 9 приведено фото пилотной экспериментальной установки УТО-100 К. Установка состоит из двух модулей (контейнеров). В первом модуле расположен толкатель отхода, камерная печь с объемом 1,9 м³, трубчатый газоохладитель. Во втором контейнере расположен фильтр керамический импульсный с системой подачи реагента, теплообменным аппаратом и дымососом.



Рис. 9. Пилотная экспериментальная установка УТО 100 К

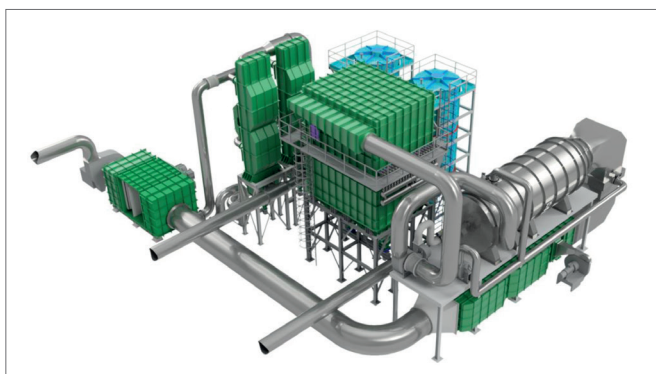


Рис. 10. Система очистки ваграночных газов на основе керамического фильтра

Результаты промышленных испытаний пилотной установки УТО-100 К при термическом обезвреживании отходов в части показателей параметров отходящих газов приведены в табл. 4. Полученные результаты промышленных испытаний по остаточной концентрации загрязняющих веществ в отходящих газах пилотной установки термического обезвреживания с системой газоочистки на основе керамического каталитического фильтра соответствуют требованиям санитарных норм, а также технологическим нормативам маркерных веществ, приведенных в ИТС 9-2020 г. Проведенные промышленные испытания легли в основу создания типоразмерного ряда установок термического обезвреживания на основе камерных и роторных печей.

В табл. 4 также содержатся результаты полупромышленных испытаний пилотных установок комплексной очистки газов, основанных на волокнистых керамических фильтрующих элементах с каталитической активацией. Некоторые результаты рассмотрим более подробно.

Плавка вторичных металлов, таких как цинк, медь, алюминий, сопровождается значительным выделением в атмосферный воздух вредных веществ — полихлорированных дибензодиоксинов и полихлорированных дибензофуранов ПХДД/ПХДФ. О негативном воздействии загрязнителей при производстве вторичной меди изложено, например, в [19, 20]. Такие технологические линии должны быть оборудованы много-

ступенчатыми системами очистки газов, состоящими обязательно из камер дожигания газов (время выдержки в камерах дожигания не менее 2 с при температуре не менее 900 °С) и фильтров. Фильтры могут быть рукавными или керамическими. В случае применения рукавных фильтров в системе должна быть обязательно «закалка продуктов горения» — резкое охлаждение с 900 до 250 °С за время не более 2 с для предотвращения вторичного образования ПХДД/ПХДФ. Закалка проводится спрейерным охлаждением продуктов горения подачей тонкораспыленной воды. Далее в системах очистки с рукавными фильтрами перед тонкой очисткой в поток с температурой до 140 °С вводится реагент сорбалит — гидратированная известь с активированным углем. Применение керамических фильтров с каталитической пропиткой значительно упрощает технологическую схему и цепь аппаратов очистки. Применение трубчатых теплообменных аппаратов не увеличивает объем очищаемых продуктов горения.

Результаты промышленных испытаний пилотных установок на основе ФГВК с каталитической пропиткой при очистке газов, образуемых при плавке вторичных металлов, приведены в табл. 4, строки 2-5. При очистке газов роторно — наклонно поворотных и камерных печей плавки вторичного алюминия достигнуты нормативные показатели маркерных веществ в соответствии с [21, 22], а при очистке газов, образуемых в камерных и конвертерных печах плавки вторичной меди, в соответствии с [19, 20, 23].

Производство минеральной теплоизоляции сопровождается выделением из ваграночной печи пыли, CO, SO₂, H₂S, NO_x и других вредных веществ. В 2023 г. были проведены полупромышленные испытания пилотной установки УТО 100 К в условиях действующего предприятия по производству теплоизоляционных материалов. Результаты данной работы приведены в табл. 4, пункт 6. При проведении испытаний пилотной установки УТО 100 К были достигнуты показатели маркерных веществ в отходящих газах в соответствии с [24, 25]. Проведенные испытания позволили разработать полномасштабную систему очистки и цепь аппаратов для очистки ваграночных газов. Общий вид разработанной в НТЦ Бакор комплексной системы отвода, охлаждения и очистки ваграночных газов приведен на рис. 10. Особенностью разработанной системы очистки ваграночных газов в отличие от используемых в настоящее время установок иностранного производства является применение керамического фильтра, в котором в одну ступень проводят очистку от взвешенных веществ и SO₂ при температуре 300-400 °С.

Разработанная установка очистки ваграночных газов (рис. 10) работает следующим образом: ваграночные газы с содержанием CO до 15 % поступают в трубчатый теплообменный аппарат, в котором они нагреваются от 150 до 400 °С за счет подачи дымовых газов, отбираемых выше по потоку. Нагретые до 400 °С ваграночные газы после трубчатого теплообменного аппарата поступают в керамический фильтр

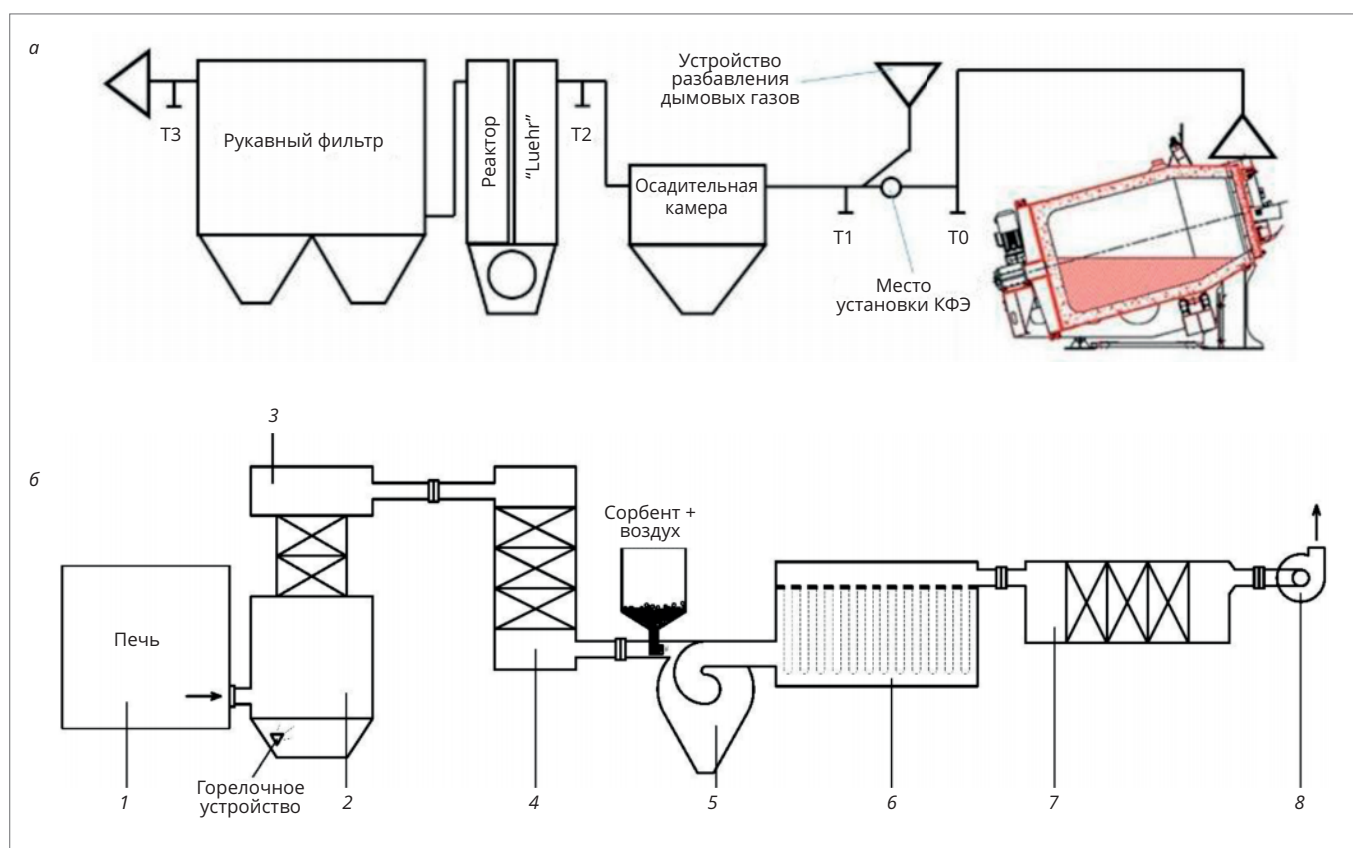


Рис. 11. Типовая цепь аппаратов системы газоочистки с рукавным фильтром и реактором кислых газов шахтного типа (а); комплексная система отвода, охлаждения и очистки газов на основе керамического каталитического фильтра (б) где: 1 – печь плавления вторичного алюминия; 2 – камера дожигания; 3 – тепло-рекуператор; 4 – трубчатый газоохладитель; 5 – реактор кислых газов; 6 – керамический каталитический фильтр; 7 – трубчатый газоохладитель; 8 – дымосос

для очистки от взвешенных веществ и SO_2 . После керамического фильтра ваграночные газы направляются в камеру дожигания, в которой происходит дожиг CO , расход природного газа в рабочих условиях при этом минимальный, порядка $35 \text{ м}^3/\text{ч}$. После камеры дожига продукты горения направляются в 5-ходовой теплообменный аппарат, в котором происходит снижение температуры дымовых газов с 850 до 360°C . Охлаждающий дымовые газы воздух при этом нагревается до 650°C и далее используется для работы самой ваграночной печи. После теплообменного аппарата дымовые газы отводятся из системы газоочистки дымососом в дымовую трубу. Разработанная система очистки ваграночных газов способна обеспечить следующие ключевые показатели маркерных веществ в отходящих газах: пыль $\leq 10 \text{ мг}/\text{м}^3$; $\text{CO} \leq 10 \text{ мг}/\text{м}^3$; SO_2 $50\text{--}350 \text{ мг}/\text{м}^3$.

Иностранные системы очистки газов, доступные по капитальным и операционным затратам для российских потребителей (производителей вторичных металлов), предлагают системы газоочистки (ГО) на основе рукавных фильтров с реакторами кислых газов шахтного типа. Охлаждение газов до 140°C , как правило, проводится путем баллаستирования продуктов горения атмосферным воздухом.

Сравним технико-экономические показатели двух систем очистки газов на основе рукавного фильтра с балластированием атмосферного воздуха (ГО с рукавным фильтром) (рис. 11, а) и на применении ке-

рамических каталитических фильтров с теплообменными аппаратами (ГО с керамическим фильтром) (рис. 11, б). Результаты полупромышленных испытаний ФКИ приведены в табл. 4 строки 3 и 4.

Расчет приведем для следующих исходных данных: расход продуктов горения, выделяемых из печи плавки $6500 \text{ нм}^3/\text{ч}$, температура отходящих продуктов горения 1000°C , оборудование находится в работе $8000 \text{ ч}/\text{год}$. Стоимость электрической энергии $5 \text{ руб}/\text{кВт}$, стоимость тепловой энергии $1200 \text{ руб}/\text{Гкал}$. В системе газоочистки с рукавным фильтром подсос атмосферного воздуха с температурой 30°C проводится до охлаждения смеси до 200°C , в случае системы газоочистки с фильтрами керамическими и пластинчатыми теплообменными аппаратами охлаждение продуктов горения проводят в теплообменных аппаратах без подсоса атмосферного воздуха. Результаты сравнительного расчета приведены в табл. 5.

Данные, приведенные в табл. 5, свидетельствуют о том, что система очистки газов на основе керамического фильтра с теплообменными аппаратами в 2,1 раз дешевле по капитальным затратам по сравнению с типовой системой очистки газов на основе рукавного фильтра с подсосом атмосферного воздуха для снижения температуры продуктов горения перед фильтром. Индикативная цена очистки газов (капитальные + операционные расходы) за 20 лет эксплуатации на расход $1 \text{ нм}^3/\text{ч}$ у системы газоочистки с керамическим

фильтром в 2,7 раза меньше чем в случае с рукавным фильтром. Важно отметить, что система очистки газов на основе ФГВК с каталитической активацией обеспечивает также очистку газов от CO, ЛОС, углеводородов, ПХДД/ПХДФ в соответствии с [21, 22] – в отличие от системы с рукавным фильтром и подсосом атмосферного воздуха.

Стоит также отметить, что очистка газов в керамических газовых фильтрах является наилучшей доступной технологией и отражена в двух справочниках ИТС НДТ [26, 27].

ВЫВОДЫ

1. Разработанные и производимые в НТЦ «Бакор» волокнистые фильтрующие элементы (ФГВК) и фильтровальные установки на их основе для очистки высокотемпературных газов на протяжении более 25 лет получают все более широкое распространение в различных отраслях промышленности для достижения существующих и перспективных нормативов маркерных веществ в атмосферу. Фильтрующие элементы основаны на муллитокремнеземистых волокнах, способных обеспечивать очистку газов с температурой до 1000 °С.

2. ФГВК относятся к классу высокоэффективных фильтров Н10 в соответствии с ГОСТ Р 51251–99 и способны обеспечивать эффективность очистки от твердых частиц с медианным диаметром $d_{50} = 0,6$ мкм до 96,9 % в диапазоне скоростей фильтрации от 1,2 до 3 м/мин. Аэродинамическое сопротивление волокнистых керамических фильтрующих элементов составляет от 350 до 500 Па при удельной газовой нагрузке 100 ($\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$) при н. у.

3. Волокнистые фильтрующие элементы (ФГВК) выполнены в виде полых свечи, могут быть изготовлены диаметром от 60 до 150 мм и длиной до 6000 мм. Прочность при диаметральной сжатии составляет 0,68 МПа, а на разрыв 0,71 МПа, что позволяет применять их без поддерживающего металлического каркаса и обеспечивать целостность и работоспособность до 5 лет непрерывной эксплуатации.

4. Опытная эксплуатация ФГВК в условиях очистки пересыщенных влагой газов, а также в условиях резких изменений температур от –30 до 600 °С и воздействия изгибающих нагрузок и вибраций, вызванных перемещением фильтровальной установки, обеспечила высокую надежность ФГВК. Данный факт подтверждается и опытной эксплуатацией ФГВК при очистке газов с температурой 500 °С и содержанием SO_2 до 30%.

5. В НТЦ Бакор освоен выпуск фильтрующих элементов первого (зернистых) и второго поколения (волокнистых) любых типоразмеров, включая большего размера, диаметром 150 мм и длиной 6000 мм. Созданы пилотные установки для проведения полупромышленных испытаний в условиях действующих производств различных отраслей промышленности.

6. Проведен ряд испытаний опытно-пилотных установок, основанных на ФГВК, в результате кото-

рых были получены удовлетворительные результаты по очистке газов от взвешенных частиц и таких вредных газов, как SO_2 , HCl, HF, CO, ЛОС, бенз(а)пирены, ПХДД/Ф. По твердым частицам остаточная концентрация не превышает 10 мг/м³, а концентрации вредных газов соответствуют показателям маркерных веществ, отраженных в соответствующем справочнике ИТС НДТ.

7. Среди перспективных направлений развития очистки газов, основанных на применении керамических, в том числе и каталитических фильтров, можно отметить отрасль по производству стекла и цемента, цветную и черную металлургию, химическую и коксохимическую, химическую и нефтехимическую и др.

8. Экономический аспект внедрения комплексных систем очистки газов целесообразно рассматривать отдельно для каждого случая с учетом экологических рисков, стоимости улавливаемого материала, либо возможности получения вторичных энергетических ресурсов (горячей воды или пара). Вместе с тем, если рассматривать систему очистки газов от печи плавки вторичного алюминия на основе рукавного фильтра с подсосом атмосферного воздуха и систему очистки газов, основанную на ФГВК и теплообменных аппаратах, то у системы с ФГВК индикативная цена в 2,67 раза меньше, чем у рукавного фильтра с подсосом атмосферного воздуха.

9. Очистка газов в керамических каталитических фильтрах отражена информационно в двух технических справочниках ИТС НДТ 22-206 и 47–2017. Разработаны различные программы государственной поддержки внедрения НДТ при реализации экологических программ, это и пониженный коэффициент при внесении плат за негативное воздействие на окружающую среду, и инвестиционный налоговый кредит и др.

10. Широкомасштабное внедрение комплексных систем очистки газов на основе керамических каталитических фильтров связано с ростом промышленного производства, а также с внедрением систем мониторинга параметров отходящих газов из технологических агрегатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красный Б.Л., Тарасовский В.П., Красный А.Б. и др. Высокотемпературная очистка горячих дымовых газов промышленных печей от пыли фильтрующими элементами из пористой проницаемой керамики // Новые огнеупоры. 2006. № 11. С. 43 – 48.
2. Пат. 2307702 РФ, МПК В 01 D 69/00. Устройство для изготовления изделий с волокнистой структурой / Красный Б.Л., Киселев В.Г. и др. ; заявл. 04.04.2006 ; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 28.
3. Пат. 2371423 РФ, МПК С 04 В 35/80, С 04 В 38/00. Способ изготовления керамического фильтрующего элемента с волокнистой структурой / Красный Б.Л., Красный А.Б. и др. ; заявл. 13.05.2008 ; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30.
4. Пат. 2789585 РФ, МПК В 01 D 46/24, В 01 D 37/03, В 01 D 39/06, В 01 D 39/16, В 01 D 53/34 № 2022100662. Спо-

- соб изготовления фильтрующего элемента для очистки горячего газа / Красный Б.Л., Красный А.Б., Иконников К.И., Сизова А.С. ; заявл. 14.01.2022 ; опубли. 06.02.2023, Бюл. № 4.
5. Sizova A., Rodimov O., Galganova A. Influence of drying process on the aluminosilicate fiber hot gases filter element properties // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48, Iss. 19, Part B. P. 29165 – 29174.
 6. VDI 3677 Blatt 3 / Part 3. Filtering separators. High-temperature gas filtration. – Dusseldorf : Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2012.
 7. Методика испытаний на прочность ООО «НТЦ Бакор» / МИ 15112213-58–2022.
 8. Humalamaki J. Mechanical characterization of fibrous ceramic filter elements. – Tampere : University of technology, 2013.
 9. Методика измерения воздухопроницаемости фильтров газовых керамических волокнистых ООО «НТЦ «Бакор».
 10. ГОСТ 17.2.4.06–90. Охрана природы (ССОП). Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения.
 11. ГОСТ 17.2.4.07–90. Охрана природы (ССОП). Атмосфера. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения.
 12. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли пыли, дымы и туманы. – М. : Химия. 1972. – 420 с.
 13. Красный Б.Л., Красный А.Б., Королев М.Н. и др. Аспирация загрузки железорудных окатышей в железнодорожные вагоны с применением керамического фильтра // *Черная металлургия: Бюл. НТИ*. 2023. № 6. Т. 79. С. 56.
 14. Красный Б.Л., Красный А.Б., Драбчук Е.А. и др. Комплексная очистка газов // *Экология производства*. 2023. № 3. С. 88 – 90.
 15. Красный Б.Л., Королев М.Н., Серебрянский Д.А. и др. Комплексная химическая очистка дымовых газов установок термического обезвреживания отходов с помощью каталитического фильтра // *Экология и промышленность России*. 2023. № 27(7). С. 4 – 10.
 16. Krasny B.L., Korolev M.N., Serebryansky D.A. et. al. Comprehensive Chemical Cleaning of Flue Gases of Thermal Waste Treatment Plants Using a Catalytic Filter // *Ecology and Industry of Russia*. 2023. July. P. 4 – 10.
 17. Красный Б.Л., Красный А.Б., Королев М.Н. и др. Термическое обезвреживание отходов в печах с инновационной системой газоочистки в керамическом каталитическом фильтре : материалы междунар. науч.-техн. конф. *Экология в энергетике ВТИ 2023*. – Волжский ВТИ.
 18. ИТС НДТ 9–2020. Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами
 19. Руководящие принципы по наилучшим имеющимся методам и предварительным указаниям по наилучшим видам природоохранной деятельности применительно к статье 5 и приложению к Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях (Женева, Швейцария. 2006).
 20. Федеральный закон от 27.06.2011 № 164-ФЗ О ратификации Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях.
 21. Информационно-технологический справочник по наилучшим доступным технологиям (ИТС НДТ 11–2022). Производство алюминия. – М. : Бюро НДТ. – 263 с.
 22. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries, European Union. 2017. EUR 28648 EN.
 23. ИТС 3–2019. Производство меди. – 225 с.
 24. ИТС НДТ 5–2022. Производство стекла. – М. – 131 с.
 25. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass. European Commission. Joint Research centre 2013. P 459.
 26. ИТС 47–2017. Системы обработки (обращения) со сточными водами и отходящими газами в химической промышленности. – М. : Бюро НДТ. – 114 с.
 27. ИТС 22–2016. Очистка выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при производстве продукции (товаров) а также при проведении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. – М. : Бюро НДТ. – 198 с.

Статья поступила 28.06.2024