

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ УСТАНОВКИ ПЕННОЙ ПЫЛЕГАЗООЧИСТКИ ПРОИЗВОДСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО КРАСНОГО ФОСФОРА

О. В. Долгова, А. А. Матвеев, А. В. Козачек

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, Россия; ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз», Московская обл., Дзержинский, Россия

Ключевые слова: орошающая жидкость; очистка газопылевых выбросов; пенная фильтрация; пенный абсорбер; промышленная установка; частицы красного фосфора.

Аннотация: Проведены промышленные испытания установки пылегазоочистки производства модифицированного красного фосфора, работающей по принципу пенной фильтрации и абсорбции. Проверялись работоспособность основного технологического оборудования и соответствие эксплуатационным характеристикам системы пылегазоочистки в целом. Показано, что установка работоспособна, в процессе эксплуатации достигнуты значения, соответствующие требованиям, заложенным в техническом задании. Степень очистки пылегазовых выбросов от пыли красного фосфора более 99 %. Определены параметры работы установки, поддержание которых при эксплуатации оборудования в заданных интервалах обеспечит максимальную степень извлечения токсичных веществ из промышленных выбросов.

Введение

Установка газоочистки – составная часть технологической линии по производству модифицированного красного фосфора, предназначенная для улова и очистки от пылей и газов, образующихся при фильтровании, сушке, транспортировании, классификации и укупорке модифицированного красного фосфора.

Долгова Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, Тамбов, Россия; Матвеев Алексей Алексеевич – доктор технических наук, заместитель генерального директора, ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз», Московская обл., Дзержинский, Россия; Козачек Артемий Владимирович – кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: artem_kozachek@mail.ru, ТамбГТУ, Тамбов, Россия.

В настоящее время не существует массовых типовых установок и линий газоочистки для цехов по производству модифицированного красного фосфора. Это связано с относительно нечастым обустройством таких цехов на предприятиях, а также со сложностью организации самого процесса газоочистки.

Одним из вариантов газоочистки от модифицированного красного фосфора является использование установок пенной фильтрации и абсорбции. Однако в силу их новизны и отсутствия типовых конструкций необходимо обеспечить процедуру промышленных испытаний предлагаемых установок.

Промышленные испытания являются финальным этапом разработки установки пылегазоочистки и включают подбор оборудования, создание лабораторной установки [1], отработку технологии на лабораторном стенде [2], изготовление и монтаж технологического оборудования.

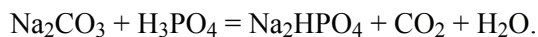
Цель работы – подтверждение работоспособности технологического оборудования и достижение показателей, заложенных в техническом задании (при проведении промышленных испытаний на месте эксплуатации установки пылегазоочистки).

Установка пенной фильтрации и абсорбции

Разработана, изготовлена и смонтирована на производстве установка пылегазоочистки, работающая по принципу пенной фильтрации и абсорбции. Данная установка с производительностью по очищаемому газу 4500...6000 м³/ч является частью технологической линии по производству модифицированного красного фосфора.

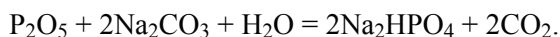
Установка пылегазоочистки используется для очистки газопылевых выбросов, обеспечивая одновременную очистку от гидрофобной (красный фосфор) и гидрофильной (пятиокись фосфора) пыли различного дисперсного состава, со степенью извлечения не менее 90 %, при температурах газов до 80 °С; состоит из двух частей: аппарата мокрой очистки – пенного скруббера, предназначенного для улова тонкодисперсной пыли и кислых паров, и бака-отстойника для накопления уловленной в орошающую жидкость пыли красного фосфора, осаждения и последующего возврата в начало технологического процесса модификации.

При обеспыливании аспирационных газов в аппарате мокрой очистки происходит взаимодействие пыли, содержащей красный фосфор Р_n, фосфорный ангидрид Р₂О₅, ортофосфорную кислоту Н₃РО₄, с водным раствором карбоната натрия Na₂СО₃. Взаимодействие происходит непосредственно в слое пены, характеризующейся высокой турбулентностью



Выделяющийся при реакции углекислый газ увеличивает поверхность и объем пены, а появление в растворе двузамещенного фосфата натрия способствует смачиванию пылинок фосфора и увеличивает степень очистки на 3 – 5 % [3].

Фосфорный ангидрид, который может присутствовать в виде микропримесей, взаимодействует с карбонатом натрия в водной среде



Пыль красного фосфора может содержать до 0,3 % H_3PO_4 , одного объема бака оборотной воды ($0,6 \text{ м}^3$), содержащего 6 кг карбоната натрия, достаточно для улова и нейтрализации 5,53 кг H_3PO_4 , или ~1840 кг уловленной пыли красного фосфора. В технологический процесс закладывается полная замена орошающей жидкости в баке (один раз в месяц). Компенсация прореагировавшего карбоната натрия производится не менее одного раза в неделю.

Для нормальной работы установки пылегазоочистки и получения требуемой степени извлечения газопылевых выбросов необходимо обеспечить и контролировать следующие параметры:

- температуру газов на входе не более $80 \text{ }^\circ\text{C}$;
- производительность газозооочистки через скруббер $4500 \dots 6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ газа. При расходе газа менее $4500 \text{ м}^3/\text{ч}$ на тарелке не образуется пена в достаточном количестве, при подаче газа более $6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ может начаться унос отдельных капель орошающей жидкости через трубу для выброса газа в атмосферу, а при подаче газа более $7200 \text{ м}^3/\text{ч}$ начинается интенсивный унос жидкости;
- удельное орошение от 1,2 до $2 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- температуру содового раствора, не более $40 \text{ }^\circ\text{C}$;
- pH содового раствора не ниже 8,5;
- концентрацию содового раствора 1 % масс $\pm 20 \%$ Na_2CO_3 ;
- запыленность газа на входе не более $6,0 \text{ г}/\text{м}^3$.

Промышленная установка пылегазоочистки работает следующим образом (рис. 1). Технологические газы после фаз сушки и классификации модифицированного красного фосфора поступают через газоходы на установку пылегазоочистки, движение газопылевых выбросов обеспечивает вентилятор 5 (установленный после скруббера), который подает поток под разрежением в установку пылегазоочистки. Газопылевые выбросы проходят через слой пены, находящийся внутри аппарата.

Поверхность пены орошается жидкостью, поступающей сверху через форсунки. Газы, прошедшие через пену, поступают в брызгоуловитель 4, где освобождаются от капель жидкости, которая стекает вниз на тарелку скруббера. Очищенные газы выбрасываются в атмосферу.

Для орошения тарелки скруббера и создания слоя пены применяется вода или раствор натрия двууглекислого (карбоната натрия). Раствор для орошения готовится на участке водоподготовки, допускается изготавливать раствор в баке-отстойнике 1, в который подается водопроводная вода до заполнения, затем загружается натрий двууглекислый (карбонат натрия) из расчета $10 \text{ кг}/\text{м}^3$. Перекрываются краны аварийного перелива, подачи жидкости на скруббер. Включается перемешивание до полного растворения карбоната натрия. Полнота растворения проверяется визуально через люк на крышке бака-отстойника 1.

При работе скруббера 3 раствор из бака-отстойника 1 подается в рабочее пространство абсорбера циркуляционным насосом 2. Уловленный дисперсный красный фосфор оседает и накапливается в конической части циркуляционного бака-отстойника. Примесь пятиоксида фосфора, которая

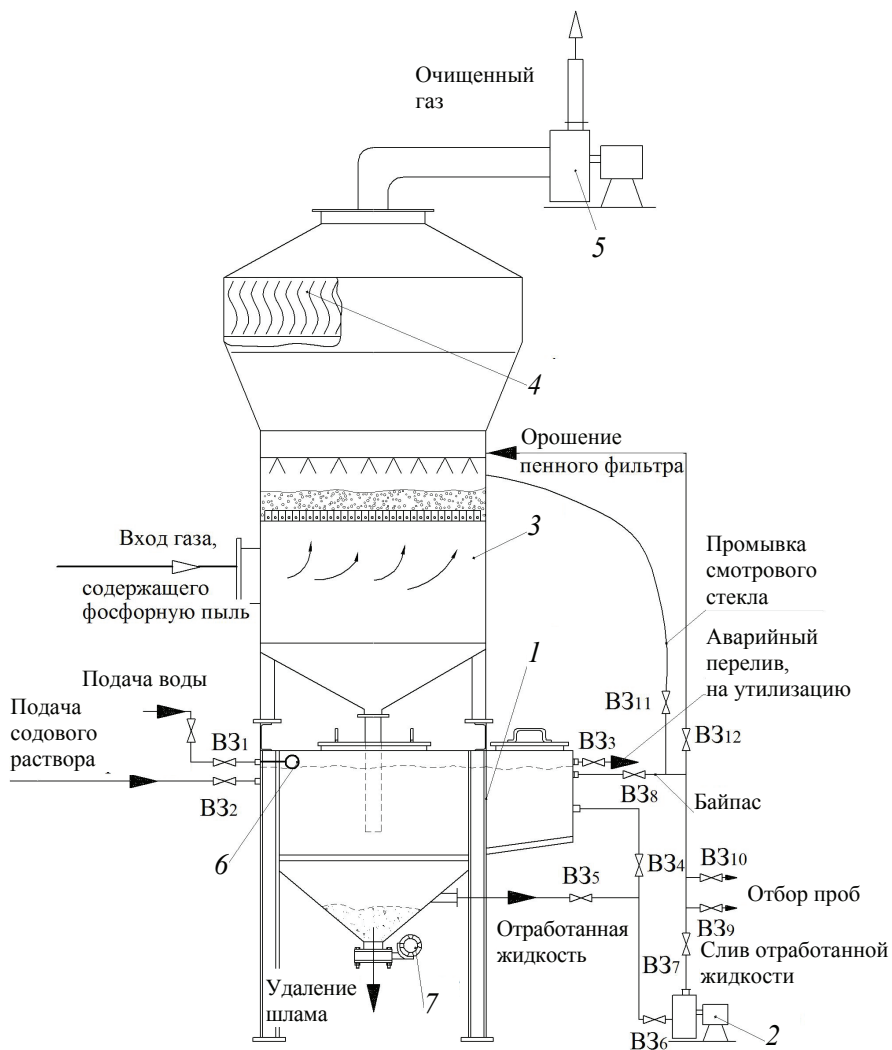


Рис. 1. Принципиальная схема установка пылегазоочистки от красного фосфора:
 1 – бак-отстойник; 2 – насос циркуляционный КМ-32-22-120; 3 – пенный абсорбер;
 4 – брызгоуловитель (каплеуловитель); 5 – вентилятор ВР-86-77 4К1; 6 – регулятор уровня;
 7 – затвор дисковый АВРА ВУV-VF826D80G

может присутствовать на частицах уловленного красного фосфора, взаимодействует с водой и карбонатом натрия с образованием фосфатов натрия Na_3PO_4 и Na_2HPO_4 – хорошо растворимых в воде соединений.

В процессе предусмотрен внутренний технологический водооборот. Шлам, состоящий из красного фосфора, освобожденного от оксидов фосфора из отстойной части бака-отстойника периодически сбрасывается в контейнер для возврата на стадию модификации красного фосфора. Содовый раствор из бака может использоваться без замены до трех месяцев. Отработанный содовый раствор из бака-отстойника воды подается насосом 2 на узел очистки сточных вод основного производства красного фосфора, откуда после обезвреживания сбрасывается в промышленную канализацию предприятия, где разбавляется сточными водами предпри-

ятия до норм сброса на очистные сооружения, или может использоваться в технологических нуждах цеха.

При необходимости для орошения скруббера 3 может использоваться водопроводная вода без введения реагентов. В этом случае образуется сточная вода с рН около 3, в количестве примерно $0,6 \text{ м}^3$ в сутки. Эксперименты показывают, что в чистой воде отстаивание уловленных частиц красного модифицированного фосфора происходит в три раза быстрее, чем в растворе карбоната натрия, за счет отсутствия флотации, обусловленной пузырьками углекислого газа, образующегося при реакции с фосфорной кислотой [2].

Скруббер представляет собой колонну, в которой последовательно по направлению движения загрязненного газа размещены: провальная тарелка 1, на которой происходит образование пены; распределитель пены 2, препятствующий появлению волн пены на тарелке; распределитель жидкости 3 для равномерного распределения орошающей жидкости по поверхности тарелки; каплеуловитель 4 для предотвращения уноса жидкости (рис. 2). Внутри аппарата смонтирован фонарь 5, что обеспечивает возможность контролировать наличие пены в аппарате и сам процесс газоочистки через смотровое окно 6, на которое подается жидкость 7 для смыва пылинок. Также в скруббере предусмотрены технологические люки, для обслуживания и ремонта.

Технические характеристики скруббера представлены в табл. 1.

Бак-отстойник содержит три технологических люка с крышками 1 для его обслуживания и мойки, перегородку, препятствующую попаданию неотстоенной жидкости в зону забора раствора насосом на орошение, дискового затвора 7 для выгрузки шлама красного фосфора, патрубка для слива отработанной жидкости, проушин для подъема бака-отстойника, опорных швеллеров для установки на них скруббера (см. рис. 1). Полный объем бака-отстойника $0,81 \text{ м}^3$, полезный – $0,73 \text{ м}^3$.

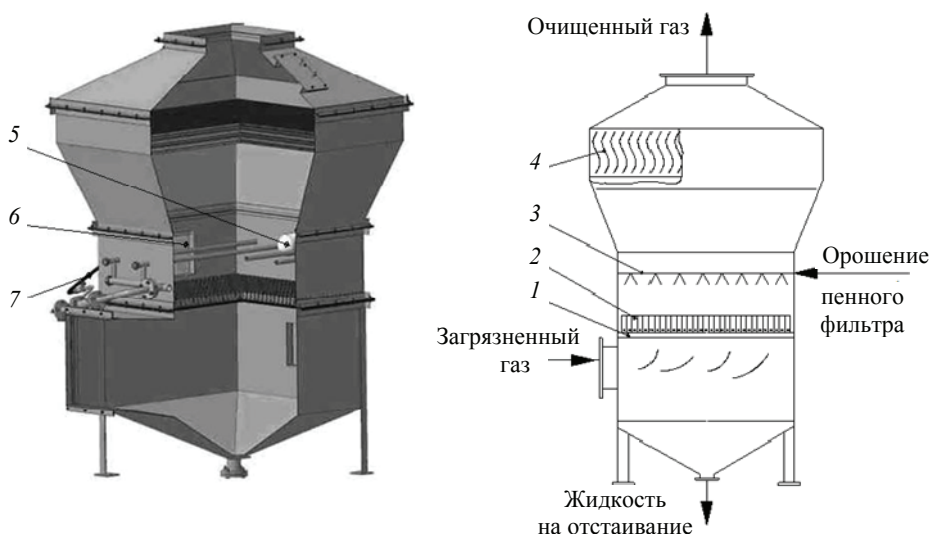


Рис. 2. Промышленный пенный скруббер:

1 – провальная тарелка; 2 – распределитель пены; 3 – орошающее устройство;
4 – каплеуловитель; 5 – фонарь; 6 – смотровое окно; 7 – орошение смотрового окна

Таблица 1

Технические характеристики пенного скруббера

Параметр	Значение
Рабочее давление	Атмосферное
Производительность по газу, $\text{м}^3/\text{ч}$	4500...6000
Площадь рабочего сечения аппарата, м^2	0,56
Скорость газа в аппарате, м/с	2,0...3,0
Тип решетки	Дырчатая
Плотность орошения, кг жидкости/ м^3 газа	0,05...0,2
Температура не более, °С: газа на входе	90
содового раствора	50
Концентрация содового раствора, % масс. Na_2CO_3	1
Запыленность газа на входе не более, $\text{г}/\text{м}^3$	15,0
Диаметр воздуховода вход/выход, мм	400/400
Гидравлическое сопротивление, Па	700
Масса пенного скруббера, кг: порожного	525
в рабочем состоянии, максимальная	575

**Ход испытаний установки пылегазоочистки
производства красного фосфора**

Испытания установки пылегазоочистки от красного фосфора состоят из нескольких этапов.

Первый этап – проверка системы подачи жидкости.

Перед пуском установки бак-отстойник заполнили орошающей жидкостью (водой), которую подали в бак из водопроводной сети. Время заполнения бака составило 27 минут. Бак выдерживали в течение 3 часов. Течей из швов бака не обнаружено.

Затем орошающая жидкость из бака-отстойника с помощью циркуляционного насоса КМ-32-22-120 подавалась в верхнюю часть скруббера пенного на форсунки, которые распределяют жидкость равномерно по тарелке провального типа. Подача жидкости на тарелку отрегулирована и измерена с помощью мерной емкости и секундомера при закрытых кранах ВЗ₅, ВЗ₈, ВЗ₉, ВЗ₁₁, ВЗ₁₂ и открытом ВЗ₉ (то есть при работе на слив), остальные краны на линии циркуляции жидкости открыты (см. рис. 1). Расход жидкости установлен $1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ в соответствии с рекомендациями, полученными ранее, при отработке макетной установки газоочистки [4]. Затем открыли кран ВЗ₁₂ и подали жидкость на циркуляцию на тарелку. Подача жидкости зафиксирована через смотровое окно.

Второй этап – проверка система подачи воздуха в скруббер. Движение газа по установке газоочистки обеспечивает вентилятор ВР-86-77 4К1, установленный после скруббера.

Расход газа определяли с помощью дифференциального манометра цифрового ДМЦ-01. Прибор состоит из блока управления, трубки НИИОГАЗ, подсоединенной к прибору с помощью резиновых трубок. Трубка вводилась в газоход на выходе из скруббера через специальные патрубки, замеры проводили в пяти точках сечения, равномерно удаленных друг от друга. Затем определялась средняя скорость по сечению трубопровода и, так как сечение газохода известно, рассчитывался объемный расход воздуха через скруббер. Измерение расхода проводилось на очищенном потоке воздуха после абсорбции, для того чтобы взвешенные частицы не попадали в прибор. Расход воздуха составил $5800 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Визуально, через смотровое окно определено время образования пены на тарелке, которое составило 5 минут.

Третий этап – комплексные испытания.

Проведено два испытания работоспособности пенного скруббера – на воде и однопроцентном содовом растворе. Бак-отстойник заполнен водой, запущены насос и вентилятор. Через 10 минут, после визуальной проверки образования пены на тарелке, с помощью шлюзового питателя модифицированный красный фосфор из расходного бункера дозировался в аппарат-классификатор «Вибрационное сито» и далее на операцию расфасовки.

Аппарат-классификатор «Вибрационное сито» изготовлен из нержавеющей стали, используется для классификации модифицированного красного фосфора, представляет собой одномассную колебательную систему, в колеблющиеся части которой входит корпус с ситами, соединенный с корпусом вибровозбудителя, задающим колебания системе. Вращение вибровозбудителю передается от электродвигателя через муфту. Колеблющиеся части сита опираются на раму через виброизоляторы. Исходный материал подается в загрузочный патрубок, полученные после просеивания фракции выходят из сита через разгрузочные патрубки. Целевая фракция (проходя через сетку) поступает в стальной барабан, установленный на вибростоле и укупоривается.

Отсев модифицированного красного фосфора в виде спекшихся кусочков из вибросита (отсев с сетки 250 мкм) собирают в отдельный барабан и направляют на переработку в аппарат «Смеситель-гранулятор», где его присоединяют к основному потоку.

В аппарат-классификатор «Вибрационное сито» подается азот под давлением 0,004 МПа и с постоянным расходом $10...30 \text{ нм}^3/\text{ч}$, который поддерживался в течение процесса испытаний. Отходящий газовый поток от аппарата-классификатора «Вибрационное сито» и фасовки модифицированного красного фосфора по системе вентиляции поступает на очистку. Очистка загрязненного пылью красного фосфора газового потока осуществлялась в установке газоочистки. Газовый поток поступал через газоходы на установку пенной очистки и очищался, проходя через слой пены, находящийся внутри абсорбера. Отбор проб газа на входе и выходе из установки газоочистки проводились с помощью аспиратора ПУ-4Э.

Таблица 2

**Результаты промышленных испытаний установки газоочистки
производства красного фосфора**

Наименование параметра	Результат определения		Требования технического задания
	Орошающая жидкость – 1%-й содовый раствор	Орошающая жидкость – вода	
Концентрация пыли красного фосфора, мг/м ³ : до установки газоочистки	1310,0	1318,1	не нормируется менее 20
после установки газоочистки	10,3	10,5	
Степень очистки, %	99,2		не менее 90
Определение после установки газоочистки: фосфорной кислоты и фосфорного ангидрида, мг/дм ³	0,01	0,02	менее 0,06 ПДК _{р.з} – 0,1
фосфина, мг/м ³	менее 0,1		
Температура воздуха, подаваемого на очистку, °С	20		менее 80
Расход газа через установку газоочистки, м ³ /ч	5800		4500...6000
Примечание. ПДК _{р.з} – предельно-допустимая концентрация вещества в воздухе рабочей зоны [5].			

Результаты испытаний работы установки газоочистки приведены в табл. 2. Как видно из полученных данных, все определенные параметры соответствуют требованиям технического задания на установку пылегазоочистки производства модифицированного красного фосфора.

Выводы

Разработана, изготовлена, смонтирована и испытана на производстве установка пылегазоочистки – составная часть технологической линии по производству модифицированного красного фосфора с производительностью по очищаемому газу 4500...6000 м³/ч.

Проведенные промышленные испытания показали, что все контрольные параметры соответствуют требованиям технического проекта на установку пылегазоочистки производства модифицированного красного фосфора. Степень очистки промышленных выбросов производства составила 99,2 %.

На основании проведенных испытаний установка пылегазоочистки производства модифицированного красного фосфора может быть допущена к опытно-промышленной эксплуатации.

Список литературы

1. Долгова, О. В. Проектирование лабораторной установки для экспериментальных исследований процесса пенной очистки газопылевых выбросов от красного фосфора / О. В. Долгова, Ю. В. Лопатюк, А. В. Козачек // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского.* – 2021. – № 4 (82). – С. 13 – 20. doi: 10.17277/voprosy.2021.04.pp.013-020
2. Долгова, О. В. Экспериментальное определение ожидаемой степени очистки газопылевых выбросов от частиц красного фосфора на лабораторной установке пенной фильтрации / О. В. Долгова, А. А. Матвеев, А. В. Козачек // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского.* – 2022. – № 4 (86). – С. 14 – 21. doi: 10.17277/voprosy.2022.04.pp.014-021
3. Коузов, В. А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей // В. А. Коузов, Л. Я. Скрябина. – Л. : Химия, 1983. – 143 с.
4. Долгова, О. В. Экспериментальное обоснование величины расхода орошающей жидкости в системах пенной очистки газопылевых выбросов / О. В. Долгова, Ю. В. Лопатюк, А. В. Козачек // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского.* – 2022. – № 1 (83). – С. 40 – 45. doi: 10.17277/voprosy.2022.01.pp.040-045
5. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания»: постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2. – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL : <https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf> (дата обращения : 27.12.2022).

References

1. Dolgova O.V., Lopatyuk Yu.V., Kozachek A.V. [Design of a laboratory facility for experimental studies of the process of foam cleaning of gas and dust emissions from red phosphorus], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2021, no. 4 (82), pp. 13-20, doi: 10.17277/voprosy.2021.04.pp.013-020 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Dolgova O.V., Matveyev A.A., Kozachek A.V. [Experimental determination of the expected degree of purification of gas and dust emissions from red phosphorus particles at a laboratory foam filtration unit], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2022, no. 4 (86), pp. 14-21, doi: 10.17277/voprosy.2022.04.pp.014-021 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Kouzov V.A., Skryabina L.Ya. *Metody opredeleniya fiziko-khimicheskikh svoystv promyshlennykh pyley* [Methods for determining the physical and chemical properties of industrial dusts], Leningrad: Khimiya, 1983, 143 p. (In Russ.)
4. Dolgova O.V., Lopatyuk Yu.V., Kozachek A.V. [Experimental substantiation of the flow rate of irrigating liquid in systems for foam cleaning of gas and dust emissions], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2022, no. 1 (83), pp. 40-45, doi: 10.17277/voprosy.2022.01.pp.040-045 (In Russ., abstract in Eng.)
5. <https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf> (accessed 27 December 2022).

Industrial Tests of Dust and Gas Foam Gas Cleaning Plant from Modified Red Phosphorus

O. V. Dolgova, A. A. Matveev, A. V. Kozachek

*Tambov State Technical University, Tambov, Russia;
Federal Center for Dual-Use Technologies “Soyuz”,
Moscow region, Dzerzhinskiy, Russia*

Keywords: purification of gas-dust emission; foam filtration; foam absorber; irrigation liquid; red phosphorus particles; laboratory plant.

Abstract: Industrial tests of a dust and gas purification plant of the production of modified red phosphorus, operating on the principle of foam filtration and absorption, were carried out. The operability of the main process equipment and compliance with the operational characteristics of the dust and gas purification system as a whole were checked. It is shown that the plant is operable, during operation the values corresponding to the requirements laid down in the terms of reference have been achieved. The degree of purification of dust and gas emissions from red phosphorus dust was more than 99 %. The parameters of the plant operation have been determined, the maintenance of which during the operation of the equipment in the specified intervals will ensure the maximum degree of recovery of toxic substances from industrial emissions.

© О. В. Долгова, А. А. Матвеев, А. В. Козачек, 2023