

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

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

Ключевые слова: лабораторная установка; ожидаемая степень пылегазоочистки; орошающая жидкость; очистка газопылевых выбросов; пенная фильтрация; пенный абсорбер; частицы красного фосфора; экспериментальные исследования.

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования ожидаемой степени извлечения пыли красного фосфора из газовой фазы на лабораторной газоочистной установке пенной фильтрации. Результаты получены при параметрах работы лабораторной установки, подобных условиям эксплуатации промышленной газоочистной установки. Показана высокая ожидаемая степень извлечения красного фосфора, более 99 % для каждого из поглотителей.

Требования к установкам очистки промышленных отходящих газов ужесточаются каждый год и подразумевают использование оборудования, обеспечивающего извлечение из газовой среды не менее 90 % токсичных компонентов [1], к числу которых относится и красный фосфор. Однако выбор газоочистного оборудования по красному фосфору по показателем очистки, представленным в литературных источниках и производителями газоочистного оборудования, дает в результате лишь понимание ориентировочных значений степени извлечения, так как в данном случае не учитываются технологические особенности и свойства загрязнителей, присутствующих в очищаемых газах. Поэтому возникает необходимость определения ожидаемой степени очистки газопылевых выбросов от красного

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

фосфора с возможностью ее сравнения с требуемой степенью очистки и корректировки с учетом изменения, модернизации существующей или разработки новой технологической схемы.

Разработку газоочистных установок обычно разделяют на следующие этапы: подбор оборудования, входящего в состав установки; разработка и изготовление лабораторного стенда; проведение экспериментальных исследований на лабораторной установке по определению оптимальных параметров работы оборудования и степени очистки отходящих газов от токсичных веществ [2].

Для целей данной работы в качестве устройства очистки газопылевых выбросов от красного фосфора рассматривается установка пенной фильтрации. Оценка ожидаемой степени очистки промышленных выбросов проводилась с использованием малогабаритного лабораторного стенда, изготовленного из плексигласа, полностью моделирующего процессы, происходящие на промышленной установке пенной фильтрации [4]. Стадия экспериментальных исследований по определению степени очистки на лабораторной установке проводилась в условиях, максимально приближенных к условиям работы промышленного пенного скруббера, как по скорости газа, расходу и составу орошающей жидкости и газа, так и по концентрации в газе загрязняющих веществ [3].

Параметры поступающих на очистку газов выбраны согласно исходным данным на проектирование и техническому заданию индустриального заказчика (ФКП «Завод им. Я. М. Свердлова», г. Дзержинск): объемный расход загрязненного газа составляет 4500...6000 м³/ч с примесями, общим содержанием пыли красного фосфора до 2 г/м³, отсутствие кислых стоков.

Для проведения испытаний использовался технический красный фосфор [5]. Предварительная оценка его сыпучести показала, что технический красный фосфор плохо просеивается, комкуется, слеживается и практически не может дозироваться на всас лабораторного газоуловителя путем подачи через калиброванное отверстие.

Для устранения данного недостатка в партию красного фосфора вводилась добавка аэросила А-380 в количестве 0,2 %. Аэросил при смешивании с порошками обеспечивает их сыпучесть и несслеживаемость за счет «эффекта шарикоподшипника», когда мельчайшие сферические частицы аэросила, располагаясь между частицами дисперсного продукта, препятствуют их контакту и обеспечивают движение относительно друг друга. После введения аэросила в образец красного фосфора он приобрел требуемую сыпучесть.

Для проведения эксперимента разработана схема и смонтирован блок подачи красного фосфора на всас 7 лабораторной установки (рис. 1). Расчетная навеска красного фосфора массой 50 г помещалась в делительную воронку с краном 3, где на выходной штуцер одевалась резиновая трубка 5, конец которой подводился к всасу 7 в лабораторной установке газоочистки 1. Делительная воронка закреплялась в штативе 2, установленном на вибростол от комплекта механических сит 4.

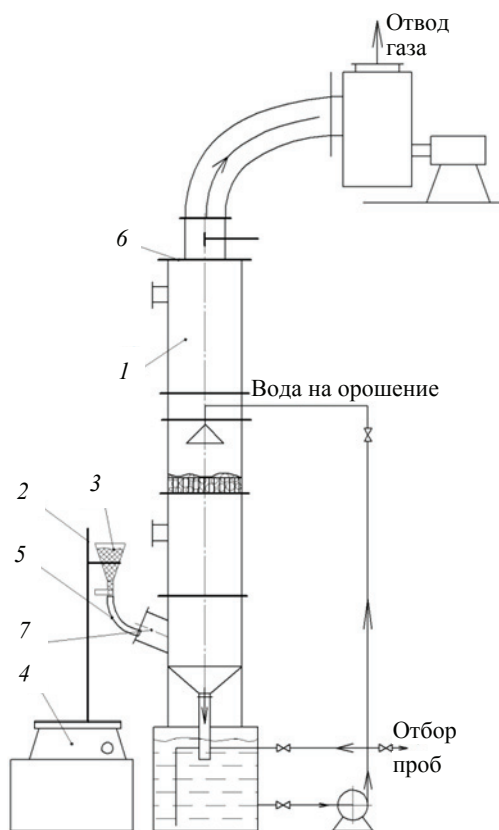


Рис. 1. Схема лабораторной установки улова красного фосфора:

1 – лабораторная установка пенной фильтрации; 2 – штатив; 3 – делительная воронка с навеской красного фосфора; 4 – вибростол; 5 – резиновая трубка; 6 – фильтр Петрянова–Соколова; 7 – всас лабораторной установки пенной фильтрации

Для обеспечения надежности эксперимента и точности измерений, снижения объема не уловленных лабораторной установкой частиц красного фосфора, во фланцы выходного газохода вставлены фильтры Петрянова–Соколова 6, которые имеют гарантированную степень улова 9996 частиц из 10 000. Фильтры предварительно взвешивались на аналитических весах.

Расход газа через макетный газоуловитель устанавливался на уровне $305 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствовало скорости $2,7 \text{ м/с}$ (расходу газа в промышленной установке газоочистки $5460 \text{ м}^3/\text{ч}$). Расход орошающей жидкости устанавливался на уровне $79 \dots 80 \text{ дм}^3/\text{ч}$, что соответствовало рекомендованному удельному расходу жидкости – $0,27 \text{ дм}^3/\text{м}^3$ газа, при котором обеспечивается оптимальный режим работы установки пенной фильтрации [3].

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе орошение осуществлялось 1%-м раствором карбоната натрия, на втором – водопроводной водой.

Пыль красного фосфора может содержать до 0,3 % H_3PO_4 [5], которая из газовой среды улавливается в слое пены в абсорбере и растворяется в воде, что приводит к уменьшению pH орошающей жидкости. Для ней-

трализации растворенных в орошающей жидкости окислов фосфора в нее вводят химические вещества, связывающие их в нейтральные нелетучие соли [6]. Наиболее дешевым и эффективным веществом является карбонат натрия – Na_2CO_3 . При реакции пятиоксида фосфора с водным раствором карбоната натрия образуются хорошо растворимые в воде трех- и двухзамещенные ортофосфаты натрия:



При этом выделяется двуокись углерода, которая увеличивает объем и поверхность контакта пены, находящейся в аппарате.

Экспериментальная работа на лабораторной установке проводилась следующим образом. Запускались насос на орошение и вентилятор. Установка работала в течение 10 минут для выхода на стационарный режим и образование устойчивого слоя пены на тарелке. Открывался кран делительной воронки с загруженным фосфором и включался вибростол. Порошок красного фосфора полностью всасывался в макетный газоочиститель в течение 5 минут. Расчетная концентрация фосфора в газовом потоке составила $1893,12 \text{ мг/м}^3$, то есть была близка к максимальной концентрации в потоке загрязненных газов производства красного фосфора (2000 мг/м^3). Визуально пена в аппарате сразу же окрашивалась в красный цвет (рис. 2).

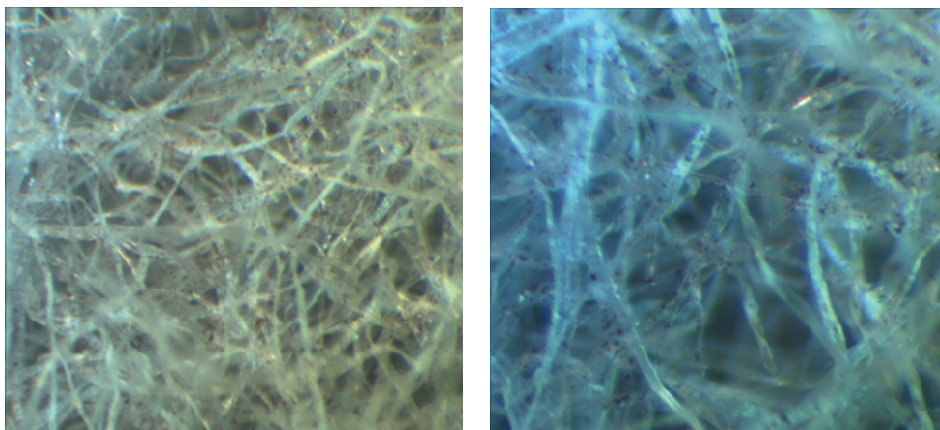
После окончания эксперимента из выходного фланца извлекался фильтр Петряного–Соколова. На рисунке 3 представлены фотографии ткани Петрянова–Соколова после улова уноса фосфора красного на лабораторной установке пенной газоочистки. Далее проводился микроскопический анализ ткани Петрянова–Соколова на микроскопе LABOVAL4. Микрофотографии, полученные с помощью Digital Camera for Microscope Scope Photo 3.0 фирмы ScopeTek, представлены на рис. 4.



Рис. 2. Улов частиц красного фосфора на лабораторной установке пенной фильтрации



Рис. 3. Внешний вид ткани Петрянова–Соколова после улова уноса фосфора красного



a)

б)

Рис. 4. Фото с увеличением $\times 50$ (*a*) и $\times 100$ (*б*) фильтровальной ткани Петрянова–Соколова после улова уноса частиц красного фосфора

Эффективность работы пенного фильтра после окончания эксперимента определяли по концентрации красного фосфора в орошающей жидкости и параллельно по количеству фосфора, прошедшего через аппарат и задержанного на фильтре Петрянова–Соколова.

После извлечения из выпуска лабораторного газоочистителя фильтр Петрянова–Соколова высушивался в муфельной печи при температуре $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы. По изменению массы фильтра, по отношению к первоначальной, определялось количество красного фосфора, не уловленного лабораторным абсорбером.

Пробы орошающей жидкости отбирали при работающем насосе, далее воду испаряли и по массе оставшейся пыли красного фосфора рассчитывали его концентрацию в орошающей жидкости и общую массу красного фосфора, уловленного жидкостью. Объемом пробы составлял 100 мл, количество параллельных проб – 3 шт.

По окончании эксперимента, при включенном циркуляционном насосе, из бака отбирали пробу воды со взвешенным красным фосфором, жидкость тщательно перемешивали в течение 30 секунд и переливали в мерный цилиндр объемом 1 литр, цилиндр ставили перед белым фоном и определяли скорость седиментации (отстаивания) красного фосфора.

Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Разница в значениях водородного показателя орошающей жидкости указывает на наличие в порошке красного фосфора фосфорной кислоты [2]. В первой серии экспериментов фосфорная кислота реагирует с карбонатом натрия. При этом высокое значение рН указывает на наличие остаточного количества карбоната натрия в растворе. Во второй – использовалась вода без добавления реагентов, фосфорная кислота растворилась в воде, подкислив ее, на что указывает низкий рН.

Экспериментально определенная на лабораторной установке пенной фильтрации ожидаемая степень улова пыли красного фосфора с использованием воды в качестве поглотителя составила 99,15 %, для 1%-го раствора карбоната натрия – 99,35 %.

Необходимо отметить, что характеристики процесса отстаивания частиц красного фосфора в воде и содовом растворе существенно отличались. Например, скорость отстаивания в воде была в 3,5 раза выше, чем в содовом растворе. Возможно, это объясняется тем, что при реакции фосфорной кислоты с карбонатом натрия образуются мельчайшие пузырьки углекислого газа, которые, находясь внутри агрегатов частиц фосфора, уменьшают их плотность и затрудняют оседание.

По результатам проведенных экспериментальных исследований на лабораторной установке пенной фильтрации можно сделать вывод, что пенная фильтрация обеспечивает высокую степень очистки от пыли красного фосфора (более 99 %), как с использованием в качестве поглотителя воды, так и содового раствора, что характеризует необходимость выбора типа и основных параметров работы газоочистного оборудования из числа систем пенной фильтрации.

Таблица 1

Сводные результаты эксперимента по определению ожидаемой степени улова пыли красного фосфора лабораторной установкой газоочистки

Параметр	1%-й водный раствор карбоната натрия			Среднее значение	Вода водопроводная			Среднее значение
	Эксперимент				Эксперимент			
	I	II	III		I	II	III	
Водородный показатель орошающей жидкости	10,45	10,48	10,43	10,45	3,47	3,52	3,51	3,5
Ожидаемая степень очистки, %	99,48	99,41	99,37	99,35	99,12	99,16	99,18	99,15
Время отстаивания, с	473	486	458	472	133	141	128	134

В качестве орошающей жидкости рекомендовано использовать 1%-й раствор соды, что обеспечивает выполнение требования к разрабатываемой технологии очистки – отсутствие кислых стоков, то есть рН сточных вод не должна быть менее 7.

Список литературы

1. Об утверждении Правил эксплуатации установок очистки газа : приказ Минприроды России от 15.09.2017 г. № 498. – Текст : электронный // Гарант. – URL : <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71750504/> (дата обращения: 07.10.2022).
2. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования : справочник / А. С. Тимонин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – Т. 1. – 1030 с.
3. 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
4. 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
5. ГОСТ 8655-75. Фосфор красный технический. Технические условия. – Взамен ГОСТ 8655-57, ГОСТ 5.1355-72 ; введ. 1977-01-01. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1999. – 8 с.
6. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник : в 3 томах / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – Т. 1. – 1024 с.

References

1. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71750504/> (accessed 07 October 2022).
2. Timonin A.S. *Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimiko-tekhnologicheskogo i prirodookhrannogo oborudovaniya: spravochnik* [Fundamentals of design and calculation of chemical-technological and environmental equipment: reference book], Kaluga: Izdatel'stvo N. Bochkarevoy, 2002, vol. 1, 1030 p. (In Russ.)
3. 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.)
4. 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.)
5. *GOST 8655-75. Fosfor krasnyy tekhnicheskij. Tekhnicheskiye usloviya* [GOST 8655-75. Phosphorus red technical. Specifications], Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 1999, 8 p. (In Russ.)

6. Timonin A.S. *Inzhenerno-ekologicheskiy spravochnik: v 3 tomakh* [Engineering and environmental reference book: in 3 volumes], Kaluga: Izdatel'stvo N. Bochkarevoy, 2003, vol. 1, 1024 p. (In Russ.)

Experimental Research in to the Expected Degree of Purification of Gas and Dust Emissions from Red Phosphorus Particles at the Laboratory Foam Filtration Plant

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

*Tambov State Technical University, Tambov, Russia;
Federal Center for Dual Technologies "Soyuz",
Dzerzhinsky, Moscow region, Russia*

Keywords: laboratory setup; the expected degree of dust and gas purification; irrigation liquid; purification of gas and dust emissions; foam filtration; foam absorber; red phosphorus particles; experimental studies.

Abstract: Experimental studies of the expected degree of extraction of red phosphorus dust from the gas phase were carried out at a laboratory gas-cleaning foam filtration plant. The results were obtained with the operating parameters of a laboratory installation similar to the operating conditions of an industrial gas cleaning installation. A high expected recovery of red phosphorus, with over 99% for each of the absorbers, is shown.

© O. V. Долгова, А. А. Матвеев, А. В. Козачек, 2022