УДК 66.074.2
DOI: 10.17277/voprosy.2021.04.pp.013-020

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ПЕННОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ КРАСНОГО ФОСФОРА

О. В. Долгова, Ю. В. Лопатюк, А. В. Козачек

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

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. Я. Борщев

Ключевые слова: лабораторная установка; пенный аппарат; проектирование; процесс газоочистки; частицы красного фосфора; экспериментальные исследования.

Аннотация: Спроектирована и изготовлена малогабаритная лабораторная установка для проведения исследований процесса очистки газовых выбросов от частиц фосфора в пенном абсорбере. Установка разработана в соответствии с требованиями теории подобия, что позволяет полностью моделировать процессы, происходящие на промышленной установке. Применение представленной установки пенной фильтрации на этапе исследований позволит оптимизировать и удешевить процесс отработки промышленной установки газоочистки.

Технический красный фосфор при хранении на воздухе взаимодействует с кислородом воздуха и парами воды с образованием фосфорного ангидрида и фосфорной кислоты, что приводит к ухудшению технологических характеристик самого красного фосфора. Для недопущения подобных явлений осуществляют модификацию красного фосфора специальными химическими реагентами. Технологический процесс модификации включает в себя стадии сушки и расфасовки модифицированного красного фосфора, где с вентиляционными газами частицы красного фосфора и фосфорный ангидрид выбрасываются в атмосферу, вызывая ее загрязнение.

Долгова Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, г. Тамбов, Россия; Лопатюк Юрий Викторович – кандидат технических наук, начальник Головной экологической лаборатории, ФГУП «ФЦДТ «Союз», г. 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, г. Тамбов, Россия.

Красный фосфор токсичен вследствие присутствия примеси 0,05…0,1 г/кг желтого фосфора (ядовит), предельно допустимая концентрация красного фосфора в воздухе рабочей зоны 0,03мг/м^3. Поэтому для соблюдения санитарно-гигиенических требований производство красного фосфора должно быть оборудовано системой очистки вентиляционных газов. Пыль красного фосфора склонна к возгоранию, в связи с чем соответствующую очистку вентиляционных газов проводят с использованием водной среды [1].

Очистку выбросов производства модифицированного фосфора, состоящих из гидрофобной пыли красного фосфора и фосфорного ангидрида, который взаимодействует с водой с образованием ортофосфорной кислоты, предлагается осуществлять в пенном абсорбере, обеспечивающем высокую степень очистки, как от пыли, так и токсичных газов. В пенных абсорберах пыль улавливается в слой пены и накапливается в баке-отстойнике, из которого после отстаивания ее можно направить в смеситель, где начинается производство модифицированного красного фосфора. В орошающую воду, при необходимости, вводят реагент для связывания уловленного фосфорного ангидрида (ортофосфорной кислоты) газов.

Проведение экспериментальных исследований по определению оптимальных условий очистки газопылевых выбросов предприятий от частиц красного фосфора на промышленной установке, смонтированной на производстве, связано со значительными трудозатратами по подготовке каждого опыта, необходимостью тщательной мойки всех ее частей, включая бак-отстойник, большим расходом реагентов в каждом опыте и не всегда совместимо с требованиями безопасности при работе промышленной установки.

Организация экспериментальной работы по изучению процесса очистки газопылевых выбросов от красного фосфора на лабораторной установке упрощает стадии эксперимента. Значительно сокращаются затраты на подготовку и проведение измерений и оценки. Кроме того, при проектировании лабораторной установки можно заранее, с учетом необходимых режимов, предусмотреть возможность регулирования расхода газа и жидкости, оформить технологические отверстия для измерения скорости газа, расхода жидкости, обеспечить необходимую степень очистки газа, организовать упрощенный отбор проб и т.д.

Расчет и разработку лабораторной установки предлагается проводить с соблюдением геометрического и гидродинамического подобия, в соответствии с принятыми требованиями теории подобия, тогда результаты лабораторных экспериментов будут актуальными для промышленного пенного газоочистителя.

При пенном режиме для моделей установок достаточных размеров в широких пределах изменения условий процесс пенообразования практически автомоделен. Высота слоя подвижной пены и гидравлическое сопротивление его почти не зависят от геометрических размеров. Пенообразование не зависит от эквивалентного диаметра аппарата $D_э$, находящегося в пределах 0,04…2,5 м, свободного сечения решетки $S_о$, равного 4 – 40 %, а также от конфигурации и размеров отверстий в некоторых пределах. Высота пены H не зависит от толщины решетки δ, δ = 1…25 мм [2].

В качестве основного критерия при оценке эффективности работы пенного слоя в процессах очистки газопылевых выбросов от частиц красного фосфора предложено выбрать удельную высоту пены $H_{уд}$, представляющую собой отношение высоты пены на решетке аппарата H, м, к высоте исходного слоя (исходным слоем называется такой слой чистой жидкости, который получился бы при разрушении пенного слоя, находящегося на решетке) жидкости $h_о$, м, уравнение которой дано в работе [4]:

$$H_{уд} = \frac{H}{h_о} = \frac{V_п}{V_ж} = \frac{\gamma_п}{\gamma_ж} = \frac{1}{\varphi_ж}, \quad (1)$$

где $V_п$ – объем пены на решетке аппарата, м^3; $V_ж$ – объем жидкости, образовавшийся при разрушении слоя пены объемом $V_п$, м^3; $\gamma_п$, $\gamma_ж$ – удельный вес пены и жидкости соответственно, м^3/кг; $\varphi_ж$ – объемная доля жидкости в пене.

Из формулы (1) видно, что удельная высота пены $H_{уд}$ обратно пропорциональна объемной доле жидкости в пене $\varphi_ж$. Таким образом, $H_{уд}$ является наиболее показательным определяемым критерием в уравнении гидродинамического подобия пенного слоя. Гидродинамическое подобие пенообразования выводится из подобия потоков газа и жидкости в слое пены [5].

Критериальное уравнение гидродинамического подобия пенного слоя, из которого определяется $H_{уд}$ [6]:

$$H_{уд} = \frac{H}{h_о} = \mathrm{Re}_г^a\, \mathrm{We}^b \left(\frac{\nu_г}{\nu_ж}\right)^c \Gamma_1^d \Gamma_2^e, \quad (2)$$

где $\mathrm{Re}_г = \frac{\omega_г D_э}{\nu_г}$ – критерий Рейнольдса для газа в сечении аппарата, $\omega_г$ – линейная скорость газа в сечении аппарата, м/с; $\mathrm{We} = \frac{\sigma}{\rho_ж g h_о^2}$ – критерий Вебера, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости на границе с газом, кг/м; $\frac{\nu_г}{\nu_ж}$ – симплекс вязкости газа и жидкости, $\nu_г$, $\nu_ж$ – кинематические коэффициенты вязкости соответственно газа и жидкости, м^2/с; $\Gamma_1 = \frac{h_о}{D_э}$ – геометрический критерий, характеризующий соотношение высоты и диаметра исходного слоя жидкости на решетке; $\Gamma_2 = \frac{m}{d_о}$ – критерий, характеризующий свободное сечение решетки, m – шаг между центрами отверстий, м, $d_о$ – диаметр отверстий решетки, м; a, b, c, d, e – безразмерные степенные члены уравнения. Величина диаметра не влияет на пенообразование, поэтому принято подставлять в критерии $D_э$ = 1,13 м, то есть диаметр аппарата с площадью сечения 1 м^2.

Для любой системы «газ – жидкость» в противоточных аппаратах [5]

$$H_{\text{уд}} = \frac{H}{h_{\text{о}}} = A_5 \left(\frac{\omega_{\text{г}} D_{\text{э}}}{\nu_{\text{г}}} \right)^{0,5} \left(\frac{\sigma}{\rho_{\text{ж}} g h_{\text{о}}^2} \right)^{-1,3} \left(\frac{\nu_{\text{г}}}{\nu_{\text{ж}}} \right)^{0,25} \left(\frac{D_{\text{э}}}{h_{\text{о}}} \right)^3, \quad (3)$$

где A_5 – расчетный коэффициент, $A_5 = 2,83 \cdot 10^{-5} \nu_{\text{г}}^{0,25} (g\rho_{\text{ж}})^{-1,3}$.

Для системы «воздух – вода» при комнатной температуре и других систем, близких к ней по физическим свойствам, расчетное уравнение (3) принимает более простой вид:

$$H_{\text{уд}} = \frac{H}{h_{\text{о}}} = 0,806 h_{\text{о}}^{-0,4} \omega_{\text{г}}^{0,5};$$

$$H = 0,806 h_{\text{о}}^{0,6} \omega_{\text{г}}^{0,5}. \quad (4)$$

Высота исходного слоя жидкости на противоточной решетке зависит от свободного сечения и диаметра отверстия решетки, линейной скорости газа в аппарате и пропускной способности решетки по жидкости, равной в данном случае плотности орошения газа $L_{\text{о}}$, м^3/м^3, или от удельного расхода жидкости на 1 м^2 решетки M, м^3/м^{2}ч. Для условий работы противоточных решеток можно записать [4]

$$h_{\text{о}} = f[\omega_{\text{г}}, L_{\text{о}}(M); t(S_{\text{о}}), d_{\text{о}}], \quad (5)$$

где $S_{\text{о}}$ – площадь свободного сечения тарелки, м^2.

Из выражений (4) и (5) выделяются основные параметры эксплуатации и геометрические характеристики для системы «воздух – вода» и систем, сходных по физическим свойствам, которые определяют подобие лабораторной и промышленной установок. Параметры эксплуатации – скорость газа в аппарате, плотность орошения, удельный расход жидкости; геометрические характеристики – площадь свободного сечения, диаметр отверстий тарелки.

Проведенные теоретические выкладки и их применение при проектировании лабораторной установки позволяют результаты экспериментов по определению основных технологических параметров и оценки ожидаемой степени очистки промышленных выбросов производства модифицированного красного фосфора, полученные на лабораторной установке, переносить на промышленную установку.

В таблице 1 приведено сравнение характеристик промышленной установки газоочистки и макетной лабораторной модели, которые имеют практически полное совпадение (в пределах ±10 %) соотношений всех определяющих параметров: скоростей газа в колонне и отверстиях тарелки, плотности орошения, удельного расхода жидкости.

Малогабаритная лабораторная установка спроектирована и изготовлена в соответствии с условиями равенства выделенных из уравнений (4) и (5) параметров эксплуатации и геометрических размеров.

Таблица 1

Сравнение характеристик промышленной установки и макетной лабораторной модели

Показатель	Пенный аппарат	Модель
Параметры, определяющие подобие установок		
Тип тарелки	Провальная	
Плотность орошения газа, $L_o \times 10^3$, м^3/м^3	0,05…0,4	
Удельный расход жидкости (отнесенный к площади тарелки) M, м^3/(м^2·ч)	0,354…1,9	0,32…2,3
Диаметр отверстия решетки (тарелки) d_o, мм	5	4,5
Площадь отверстий, м^2 → % от площади сечения колонны S_o, м^2	0,076 → 18 %	0,0058 → 18,5 %
Параметры работы установок		
Производительность по газу G, м^3/ч	4 500…6 000	150…360
Скорость газа:		
в колонне $\omega_г$, м/с	1,9…3,0	1,7…3,0
в отверстии тарелки ω_o, м/с	8,5…16,45	8,3…17,24
Материал	Сталь 12Х18Н10Т	Оргстекло
Расход орошающей жидкости L, дм^3/ч	1 000…1 200	10…72
Толщина решетки δ, мм	5	7
Площадь сечения колонны $S_{сеч}$, м^2	0,56	0,0314
Диаметр колонны (или $L \times L$) D, м	0,748 × 0,748	0,198
Шаг между центрами отверстий m, мм	11,5	9,0

Общий вид и схема спроектированной малогабаритной лабораторной установки для экспериментальных исследований процесса пенной очистки газопылевых выбросов от частиц красного фосфора представлена на рис. 1. Лабораторная установка пенной газоочистки изготовлена из оргстекла, состоит из соединенных между собой секций высотой 135 или 400 мм, диаметр секций 200 мм. Каждая секция снабжена технологическим отверстием *7*, для проведения замеров внутри колонны. Жидкость находится в растворном баке *3*, соединенным с центробежным электронасосом *4*, расход регулируется с помощью байпаса по показаниям ротаметра. Установка работает под разряжением, вентилятор расположен на выходе из установки. Расход газа регулируется шибером *9*.

Газ поступает в колонну через входной патрубок, установленный в нижней ее части под углом 60° к вертикальной оси. Двигаясь по колонне со средней скоростью 2,0…3,0 м/с, газ проходит через отверстия тарелки, в которых его скорость возрастает до 10…15 м/с, и взаимодействуя

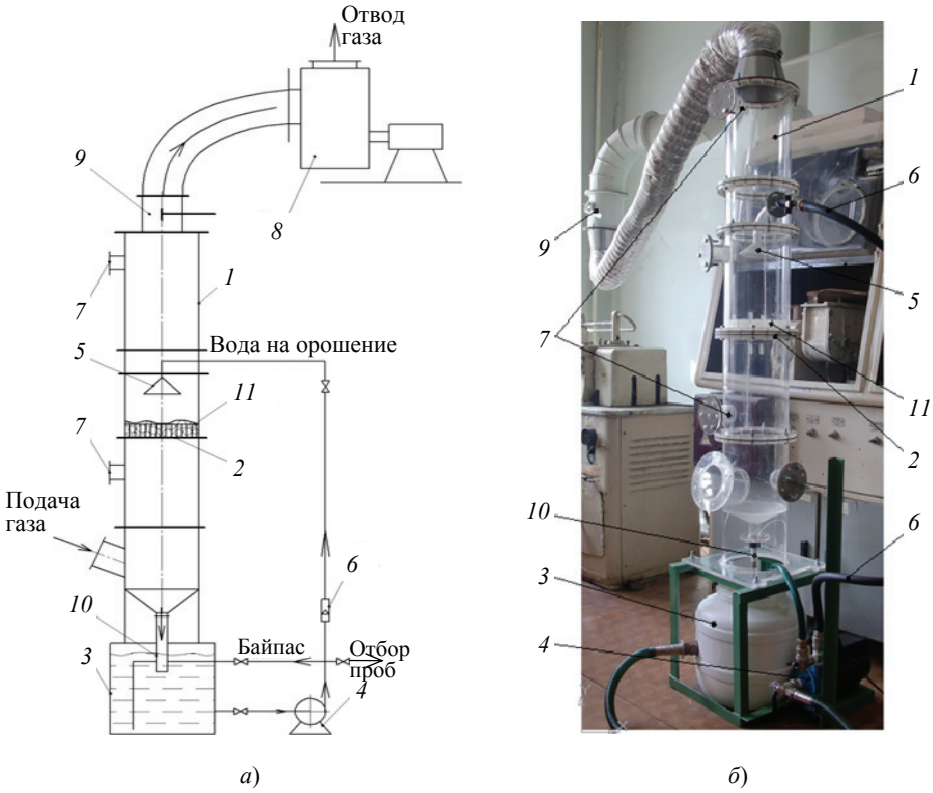

Рис. 1. Схема (*а*) и общий вид (*б*) спроектированной малогабаритной лабораторной установки для экспериментальных исследований процесса пенной очистки газопылевых выбросов от частиц красного фосфора:

1 – пенный абсорбер; *2* – провальная тарелка; *3* – расходная емкость; *4* – электронасос; *5* – распределитель жидкости; *6* – подача поглотителя в колонну, ротаметр; *7* – технологические отверстия; *8* – вентилятор; *9* – шибер; *10* – гидрозатвор; *11* – стабилизатор пены

с распределенной по тарелке жидкостью, образует пену. Для равномерного распределения пены и недопущения возникновения волнового эффекта у пены на поверхности тарелки установлен стабилизатор пены *11*, составленный из кубических ячеек с длиной ребра 30 мм. Далее очищенный газ выбрасывается в атмосферу.

Жидкость из растворного бака движется по колонне сверху вниз, попадая в колонну, затем через распределитель в виде капель орошает верхний слой пены, разрушая его, но, взаимодействуя с газом на поверхности тарелки, образует новую пену. Жидкость на тарелке удерживается потоком газа, движущегося противотоком. Ее излишки, преодолевая сопротивления газа, проваливаются в низ колонны и по трубе (гидрозатвору) попадают в бак.

При проведении лабораторных исследований на установке, спроектированной на основе предлагаемых в данной работе решений, обеспечивается возможность изменения расхода газа, жидкости, обеспечения равно-

мерности введения химических реактивов в состав орошающей жидкости. Колонна оснащена технологическими отверстиями для подсоединения приборов, измеряющих параметры работы колонны.

Использование разработанной и изготовленной малогабаритной лабораторной установки пенной фильтрации позволяет оптимизировать и удешевить процесс отработки промышленной установки газоочистки. Лабораторная установка рассчитана с соблюдением требований теории подобия. Результаты, полученные в процессе испытаний на ней, применимы для промышленной установки. На спроектированной по вышеуказанным требованиям и методам лабораторной установке появляется возможность проведения испытаний по определению плотности орошения, обеспечивающей максимальный объем пены, степени извлечения из газовой фазы пыли красного фосфора в пенный слой при различных составах орошающей жидкости.

Список литературы

1. ГОСТ 8655–75. Фосфор красный технический. Технические условия. – Взамен ГОСТ 8655–57, ГОСТ 5.1355–72 ; введ. 1977-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1977. – 21 с.

2. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Высш. шк., 1973. – 296 с.

3. Позин, М. Е. Пенные газоочистители, теплообменники и абсорберы. Работа и расчет пенных аппаратов / М. Е. Позин, И. П. Мухленов, Э. Я. Тарат. – Л. : Госхимиздат, 1959. – 123 с.

4. Раафат, В. С. Б. Поверхность контакта фаз, тепло- и массообмен на пластинчатых тарелках : дис. … канд. техн. наук : 05.17.08 / Раафат Вильсон Салама Бешай. – М., 1984. – 170 с.

5. Родионов, А. И. Поверхность контакта фаз и массопередача в тарельчатых колоннах : дис. … д-ра техн. наук : 05.00.00 / Родионов Анатолий Иванович. – М., 1969. – 390 с.

References

1. *GOST 8655-75. Fosfor krasnyy tekhnicheskiy. Tekhnicheskiye usloviya* [GOST 8655–75. Phosphorus red technical. Technical conditions], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1977, 21 p. (In Russ.)

2. Gukhman A.A. *Vvedeniye v teoriyu podobiya* [Introduction to the theory of similarity], Moscow: Vysshaya shkola, 1973, 296 p. (In Russ.)

3. Pozin M.Ye., Mukhlenov I.P., Tarat E.Ya. *Pennyye gazoochistiteli, teploobmenniki i absorbery. Rabota i raschet pennykh apparatov* [Foam gas cleaners, heat exchangers and absorbers. Work and calculation of foam devices], Leningrad: Goskhimizdat, 1959, 123 p. (In Russ.)

4. Raafat V.S.B. *PhD Dissertation* (*Technical*), Moscow, 1984, 170 p. (In Russ.)

5. Rodionov A.I. *PhD Dissertation* (*Technical*), Moscow, 1969, 390 p. (In Russ.)

Design of a Laboratory Installation for Experimental Studies of the Process of Foam Purification of Gas-Dust Emissions from Red Phosphorus

O. V. Dolgova, Yu. V. Lopatyuk, A. V. Kozachek

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

Keywords: laboratory facility; foam apparatus; design; gas cleaning process; particles of red phosphorus; experimental research.

Abstract: A small-sized laboratory unit has been designed and manufactured for laboratory research of the process of cleaning gas emissions from phosphorus particles in a foam absorber. The installation is designed in accordance with the requirements of the similarity theory, which allows you to fully simulate the processes occurring in an industrial installation. The use of a small-sized laboratory foam filtration unit at the research stage will optimize and reduce the cost of the process of developing an industrial gas cleaning unit.

© О. В. Долгова, Ю. В. Лопатюк, А. В. Козачек, 2021