



УДК 66.074+628.16

Г. Г. МИХАЙЛЕНКО, докт. техн. наук, профессор,

В. Г. РЯБЫХ, канд. техн. наук, доцент, И. С. МЕНЗАК, бакалавр, Е. И. УСАТЮК, бакалавр

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса

НОВАЯ АППАРАТУРА В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОЙ ОЧИСТКИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ И ЖИДКИХ СТОКОВ

Создана абсорбционная техника, обеспечивающая достижение санитарных норм и надежно работающая в системах с механическими взвесями, химическими вредностями, зарастанием кремнегелем. Новая система газоочистки работает на основе использования полых распыливающих аппаратов с высокопроизводительными цельюфакельными форсунками с двумя вводами. Исследования осуществлены теоретически и экспериментально. Найдены оптимальные характеристики ФсДВ и параметров работы ПРА, которые эффективнее работают при высоких скоростях газа. Предложен способ утилизации ОТР, основанный на их концентрировании, испарении воды и охлаждении концентрированного раствора. Маточный раствор, содержащий кристаллы серноокислого железа, направляется в аппараты для отделения кристаллов.

абсорбционная техника, полый распыливающий аппарат, цельюфакельные форсунки, нестационарная диффузия, сферическая модель, явление обратного переноса, утилизация ОТР, контактный аппарат, экологическая безопасность, экономическая рентабельность

Загрязнение атмосферного воздуха является одной из основных причин нарушения экологического равновесия и, как следствие, возникновения кризисных экологических ситуаций в промышленных регионах. Не менее опасным является пагубное воздействие названных выбросов на различные промышленные и даже гражданские объекты. Основным источником загрязнения воздушного бассейна пылегазовыми выбросами являются химические, нефтехимические, металлургические, цементные, асфальтобетонные предприятия и особенно ТЭЦ, работающие на низкосортном топливе – серосодержащих углях и мазутах. Непрерывное увеличение выпуска, вовлечение в названные производства все большего количества сырья различных видов сопровождается увеличением выбросов. Это обстоятельство, а также высокая токсичность таких газов, как фтор, хлор, аммиак, диоксид серы и др., требуют особого внимания к аппаратуре, используемой в системах очистки таких выбросов. Необходима надежная абсорбционная техника, призванная, с одной стороны, обеспечить достижение санитарных норм, а с другой, – способная надежно работать в системах, осложненных наличием механических взвесей и химических вредностей, склонных к зарастанию кремнегелем, с чем встретились авторы при созда-

нии промышленных систем очистки газовых выбросов от фтористых соединений (SiF_4 и HF). Все это определило и продолжает обострять проблему очистки таких выбросов от названных вредностей. В рамках этой проблемы наиболее перспективным следует признать решение, предусматривающее создание новых надежных, эффективных систем газоочистки на основе использования полых распыливающих аппаратов (ПРА), оснащенных высокопроизводительными цельюфакельными форсунками с двумя вводами (ФсДВ, рис. 1), разработанными на кафедре технологии неорганических веществ и экологии (ТНВиЭ) Одесского национального политехнического университета, способными надежно и эффективно работать, в том числе, и в условиях обезвреживания от фтористых газовых выбросов.

Исследования, результаты которых стали основанием для принятия такого решения, осуществили теоретически и экспериментально. Интегрирование уравнения нестационарной диффузии выполнили теоретическим путем [1]. В качестве модели представили центральную симметричную систему в виде капли с радиусом r_0 , обтекаемой потоком газа с концентрацией компонента C_0 , с центром которой связана сферическая система координат.

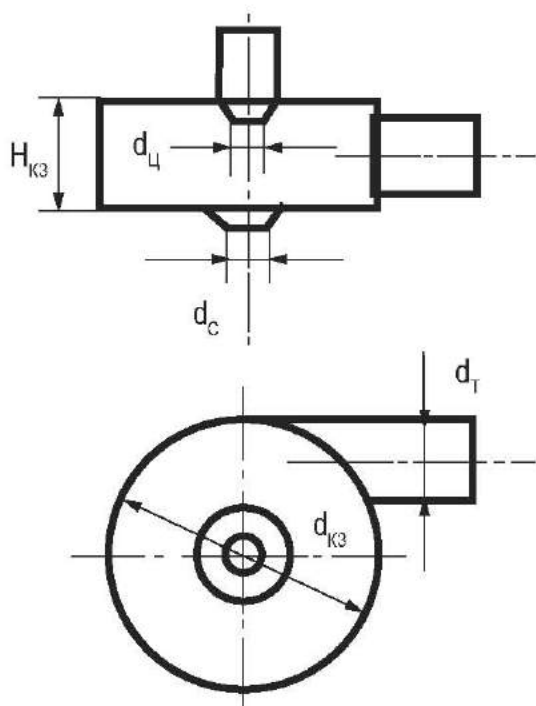


Рис. 1. Центробежно-струйная форсунка с двумя вводами:

$H_{кз}$ – высота камеры закручивания потока; d_c – диаметр центрального ввода раствора сорбента; d_t – диаметр сопла вывода раствора сорбента в ПРА; $D_{кз}$ – диаметр камеры закручивания потока сорбента; d_t – диаметр тангенциального ввода раствора сорбента в ПРА.

Для рассматриваемого случая $dC_x / dr = D_e C_{ж}$:

$$\frac{dC_x}{dt} = D_r \frac{\partial^2 C_x}{\partial z^2} \tag{1}$$

Интегрированием (1) получено

$$C_x(r, \tau) = C_0 \left[1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{r_0}{r} \sum \frac{(1)^n}{n} \cdot \sin \left(\frac{n\pi}{r_0} \cdot r \right) \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2}{r_0^2} \cdot \tau \cdot D_r \right) \right] \tag{2}$$

Результаты численного решения (2) в виде профилей изменения концентраций C_x в капле при поглощении ею SiF_4 , HF , NH_3 в виде кривых $C_x = f(r)$ показали резкое замедление процесса поглощения по мере диффузии компонента в объем капли. Так, за $\tau = 1\text{с}$ фронт диффузии продвинулся лишь на $1/8r_0$ от поверхности капли. Таким образом, в промышленных ПРА капли покидают абсорбционный объем с практически неиспользованным потенциалом поглощения $\Psi_n = r/r_0 = (r_0 - b_i)/r_0$, где b_i – расстояние по радиусу от поверхности капли в ее объем, на которое продвинулся фронт диффузии за τ_c . При скорости капли $w_k \geq 10\text{ м/с}$ и высоте абсорбционной зоны $H_a = 10\text{ м}$ время контакта $\tau_k \sim 1\text{с}$. Как показали расчеты, в таких условиях большая часть объема капли фактически не участвует в поглощении. Сохранение значительного Ψ_n отработавшими каплями указывает на целесообразность возвращения их в процесс, то есть необходимо осуществление

циклического процесса сорбции. Что касается мелких капель, процесс сорбции которых сопровождается реализацией значительной части Ψ_n , но которые выносятся из зоны сорбции, – решение об их использовании принято также с учетом результатов численных расчетов, с помощью которых реализована математическая модель процесса поглощения хорошо растворимых газов в условиях полидисперсного распыла сорбента. Установлено [1], что для капель с $d_k \leq 200\text{ мкм}$ характерно явление обратного переноса, то есть обратного потока вещества от капле к газу, когда равновесная концентрация на их поверхности становится больше, чем в газе (где C_r уменьшается за счет абсорбции каплями всего спектра дисперсности). В результате вынос мелких капель сопровождается увеличением концентрации поглощаемого компонента в обработанном газе. Это явление косвенно подтверждено экспериментально достижением практически равной степени очистки (η_s) при использовании в сопоставимых условиях форсунок малой и высокой производительности $Q_{ф}$.

Экспериментальный поиск оптимальных характеристик ФсДВ был осуществлен изменением величин отношений диаметров сопел центрального к выпускному d_c/d_t (рис. 1), диаметра камеры закручивания к ее высоте $D_{кз}/H_{кз}$ и диаметра тангенциального ввода d_t к d_c (d_t/d_c). При этом фиксировалось значение корневого угла факела β и коэффициента неравномерности $K_{нр}$. Расчет ФсДВ на производительность $Q_{ж} = 25\text{--}250\text{ м}^3/\text{час}$ и при давлении на форсунке $P_{ф} = 0,05\text{--}0,3\text{ МПа}$ (метод расчета разработали по экспериментальным данным) реализуется в следующей последовательности: $\xi = 0,76P_{ф}$; $d_c = \sqrt{Q_{ж} / 2826\xi} \sqrt{2P_{ф} \cdot 10^5 / \rho_{ж}}$. Надежность приведенной схемы расчета ФсДВ подтвердили реализацией математической модели расчета ФсДВ, основанной на представлении о вязкостном механизме вовлечения осевого потока жидкости во вращательное движение. При сравнении с известными высокопроизводительными форсунками ($Q_{ф} \leq 100\text{ м}^3/\text{час}$) установлено, что ФсДВ находится на среднем уровне со значением размеров капель $d_k = 200\text{--}500\text{ мкм}$ и распыляет жидкость на 30–50 % тоньше. Значение среднего объемного диаметра капель d_v для уже отмеченного диапазона величин $P_{ф}$ и размеров сопел $d_c = 10\text{--}38\text{ мм}$ $d_v = 56,4 d_c^{0,5} \cdot P_{ф}^{-0,4}$.

Таким образом, разработана форсунка с двумя вводами (ФсДВ), на основе которой создан новый тип цельнофакельной распыливающей техники, отличающейся отсутствием в камере закручивания различных элементов таких устройств. По результатам испытаний ФсДВ, которыми оснастили полый распыливающий аппарат (ПРА) $\varnothing 500$ установили: 1) целесообразность двухъярусного орошения ПРА; 2) рациональную плотность орошения $L = 35\text{ м}^3/\text{час}$; 3) количество форсунок в ярусе,



определяющееся по величине L , как это принято в технике распыления. Опыт внедрения такой техники показал целесообразность и экономичность ее использования для создания скоростных ПРА, действующих на предприятиях газоходов и скрубберов. В результате созданы и успешно работают такие аппараты на Сумском и Винницком ПО «Химпром» – вертикального монтажа (ВПРА), на Крымском ПО «Титан» – как вертикального, так и горизонтального (ГПРА) монтажа. При создании ВПРА в цехах красных пигментов и аммофоса (ПО «Титан», г. Армянск) перевод на скоростной режим осуществили установкой в действующих скрубберах специальных стаканов, оснащенных ФсДВ и колпаками в качестве брызгоуловителей. Стаканами перекрыли часть сечения скрубберов, обеспечив скоростную работу созданных таким образом ВПРА. После внедрения таких аппаратов на всех трех стадиях процесса получения красных пигментов достигнуты отвечающие принятым стандартам санитарные нормы. На стадии дегидратации, например, качество очистки улучшили более, чем в 60 раз. Недостатком такой системы оказалось то, что уловленную пыль (мокрая очистка) приходится высаживать и сушить (по сути, продукт) или как шлам сбрасывать в отвал, что в обоих случаях увеличивает расходы на производство. Для решения этой новой задачи разработан комплексный скруббер (заявка на патентование № 2004010254 от 13.01.2004 г. в Украине) типа «труба в трубе». В аппарате запыленный газ на 96–98 % очищается в выполняющем функции скоростного циклона наружном корпусе, из которого уловленная сухая пыль выводится в отдельный сборник, а оставшаяся мелкодисперсная (менее 2 %) улавливается во внутреннем орошаемом корпусе, из которого суспензия периодически выводится из цикла орошения в шламонакопитель. В настоящее время разработана новая схема производства фторид-бифторида аммония на Винницком ПО «Химпром» [2]. По действующей технологии обратные растворы после сорбции SiF_4 возвращаются непосредственно в ЦФБА. Предлагается сначала направлять их в верхнюю часть ПРА, используя в качестве абсорбента для поглощения аммиака из поступающих в нижнюю часть абсорбера (ПРА) отходящих газов ЦФБА, а затем направлять в ЦФБА. Таким образом, новизна предлагаемого технического решения заключается в том, что уловленный аммиак возвращается в производство. Расчетная часть циркулирующего в ПРА сорбента непрерывно отводится в реактор фтористых солей, который сбрасывается в канализацию. Расчеты показали, что предложенная реконструкция позволит: уменьшить промышленные потери аммиака с газовыми выбросами более чем в 100 раз (с 1407,7 т/год до 11,25 т/год); повысить эффективность

производства на стадиях переработки пульпы NH_4F при увеличении содержания основного компонента с 23,6 до 50,4 %; решить эколого-экономическую задачу производства по снижению вредных выбросов в атмосферу и обеспечить соблюдение санитарных норм.

Экономическую оценку разработки осуществили по общепринятой методике, используя созданный аппарат, оснащенный ФсДВ (ПРА), и задействовав для сравнения аппарат с подвижной кольцевой насадкой типа АПН. В рассмотрение включили (соответственно для ПРА и АПН) эксплуатационные (R_1) и амортизационные (R_2) расходы, которые рассчитали, исходя из производительности (нагрузки) аппаратов. С ростом нагрузки расходы R_1 возрастают (увеличивается гидравлическое сопротивление аппарата, соответственно растет расход энергии на реализацию процесса). Расходы R_2 при этом снижаются, так как конструктивные характеристики (главным образом, сечение аппарата) уменьшаются [3]. Полученные результаты представили взаимно пересекающимися кривыми амортизационных (2) и эксплуатационных (1) затрат и кривой суммарных расходов (3) в координатах $R_{1,2} = f(w_r)$ (рис. 2).

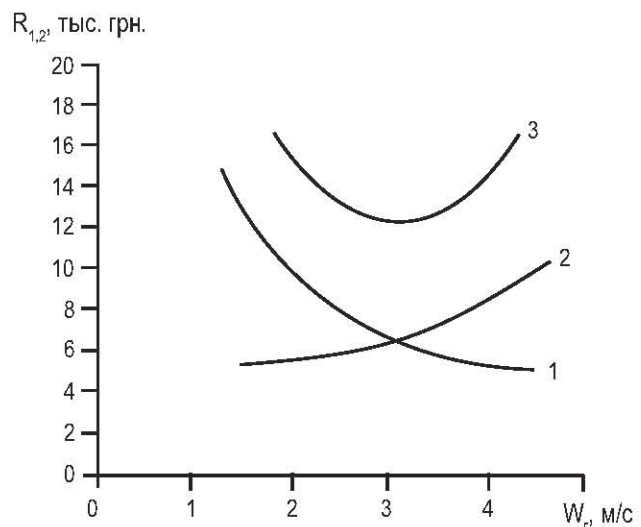


Рис. 2. Экономическая оценка аппаратов АПН и ПРА: 1 – кривая эксплуатационных расходов; 2 – кривая амортизационных расходов в зависимости от изменения скорости очищаемой газовой смеси; 3 – кривая суммарных расходов; R – величина экономических затрат.

Минимум на кривой (3) определил оптимальные условия реализации процесса. При расчете амортизационных расходов учитывали поверхности всех конструктивных элементов аппаратов, по которым рассчитывали общую стоимость материалов, а также затраты на монтаж и установку. Эксплуатационные затраты определяли в соответствии с гидравлическим сопротивлением срав-

ниваемых аппаратов при скоростях газа $w_r=1,5\div 6$ м/с. Анализ полученных результатов показал, что расходы на реализацию мокрой очистки аппаратами АПН и ПРА соизмеримы. Тем не менее, ПРА предпочтительнее, так как эффективно работают при более высоких скоростях газа (вплоть до $4\div 7$ м/с) с обеспечением степени очистки $\eta \geq 99\%$, что подтверждено экспериментально.

Наряду с решением задач использования шламов, получаемых (как было показано выше) при реализации процессов мокрой промышленной пылегазоочистки, проведены исследования в области утилизации отходов металлургической и машиностроительной промышленности, изделия которых (канаты, трубы, метизы и др.) перед нанесением антикоррозионных покрытий, как известно, подвергаются обработке растворами серной кислоты. При этом в больших количествах образуются так называемые «отработанные травильные растворы» (ОТР), содержащие до 250 г/л сульфата железа и до 10 г/л свободной серной кислоты. Например, только в одном цехе стальных канатов ПО «Стальканат», г. Одесса, образуется свыше 10 м³ ОТР в сутки. Их нейтрализуют и вывозят в отвалы. Известные методы [4] переработки таких растворов требуют использования специального оборудования и значительных энергетических затрат, что делает их экономически невыгодными. Авторами разработан новый способ очистки ОТР, при реализации которого исключается стадия нейтрализации ОТР, используются вторичные ресурсы предприятий (топочные газы), и ОТР перерабатываются в полезные продукты (железный купорос, моногидрат железа и др.).

Предложенный способ утилизации ОТР основан на их концентрировании за счет испарения воды и охлаждения концентрированного раствора, сопровождающегося кристаллизацией сернокислого железа. В разработанной технологической схеме маточный раствор, содержащий кристаллы сернокислого железа, как вариант, направляется в аппараты (фильтры, центрифуги) для отделения кристал-

лов, которые затем сушат и расфасовывают. В предлагаемой технологической схеме в качестве основного используется контактный аппарат (КА), в котором реализуется испарение растворителя (воды). Такой способ утилизации ОТР был проверен в лабораторных условиях на реальных (промышленных) ОТР с использованием в качестве теплоносителя нагретого атмосферного воздуха.

Корпус модели КА был изготовлен в виде вертикальной стальной трубы с внутренним диаметром 0,05 м и длиной 1,5 м. Внутри трубы на специальной решетке размещались 64 натянутые стальные проволоки диаметром 0,002 м. Проволоки были жестко закреплены в верхней части аппарата, выполненной в виде перфорированной горизонтальной пластины, что обеспечивало равномерную подачу ОТР на поверхность проволок. К нижней части проволок была прикреплена другая свободно колеблющаяся пластина, гарантирующая натяжение стальных проволок. Конструкция обеспечивала колебательные движения проволок за счет газового потока, что предотвращало налипание солей сульфата железа на их поверхности.

В нижнюю часть аппарата по тангенциальному патрубку подавали предварительно нагретый до температур 300–450 °С атмосферный воздух. Концентрацию солей в ОТР определяли на входе в аппарат и на выходе (в нижней части) из аппарата химическим анализом. Для отработки оптимальных режимов работы КА измеряли расходы ОТР и воздуха, а также концентрацию ОТР. Для приближения лабораторных опытов к промышленным условиям концентрацию ОТР изменяли от 200 до 350 г/л, скорость воздуха в аппарате – от 0,24 до 4 м/с, плотность орошения – от 78,5 до 130 м³/м² час. По известным методикам были рассчитаны коэффициенты тепло- и массопередачи. Определены оптимальные условия работы КА. По заказу ПО «Стальканат» (г. Одесса), рассчитан образец промышленного КА производительностью до 104 кг/час.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайленко Г. Г., Эннан А. А., Космин С. Н. Моделирование процессов абсорбции в распыливающих аппаратах // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – № 6. – С. 68–71.
2. Михайленко Г. Г., Космин С. Н. Усовершенствование процесса получения фторид-бифторид аммония // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 5. – С. 35–39.
3. Голуб А. А., Струхова Е. Б. Экономика природопользования. – М.: Аспект Пресс. – 1995. – 319 с.
4. Очистка водного и воздушного бассейнов на предприятиях черной металлургии МЧМ СССР. – М.: Металлургия. – № 8. – 108 с.



Розроблена абсорбційна техніка, яка забезпечує досягнення санітарних норм і надійно працює в системах з механічними зависями, хімічними шкідливостями, заростанням кремнегелем. Нова система газоочищення працює на основі використання порожнистих розпилювальних апаратів з високопродуктивними суцільнофакельними форсунками з двома вводами. Дослідження здійснено теоретично і експериментально. Знайдено оптимальні характеристики ФсДВ і параметрів роботи ПРА, які ефективніше працюють при високих швидкостях газу. Запропоновано спосіб утилізації ВТР, побудований на їх концентруванні, випаренні води та охолодженні концентрованого розчину. Маточний розчин, який містить кристали сірчаноокислого заліза, направляється в апарати для відділення кристалів.

Adsorption equipment providing the meeting of sanitary norms and reliably operating in systems with mechanical suspensions, chemically harmful materials, silicon gel overgrowth was developed. The new system of gas cleaning operates on the basis of using hollow spray devices (HSD) with high-efficiency all-torch spray burner with two entrances. The researches have been carried out theoretically and experimentally. Optimum characteristics of spray burners with two entrances and parameters of HSD operating, which works more effective at high speeds of gases, were found. The way of waste pickle liquor recycling based on the concentrating, water evaporation and concentrated solution cooling was proposed. Mother solution containing ferrous sulphate crystals enters to apparatuses for crystals' separation.