

УДК 338.3

Профессор С.Ю. Панов, аспирант О.М. Белых,
соискатель А.В. Зинковский, студент В.С. Момотов
(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра машин и аппаратов химических производств.
тел. (473) 249-91-13
E-mail: sergey.panov@mail.ru

Professor S.Yu. Panov, graduate O.M. Belykh,
graduate A.V. Zinkovskii, student V.S. Momotov
(Voronezh state university of engineering technologies) Department of machines and apparatus of
chemical industry. phone (473) 249-91-13
E-mail: sergey.panov@mail.ru

Особенности процесса регенерации фильтровальных перегородок

Features of the regeneration process of the filter

Реферат. Существенное влияние на эффективность и надежность фильтров оказывает работа системы регенерации. В процессе эксплуатации фильтра его гидравлическое сопротивление непрерывно возрастает, а газопроницаемость фильтровального материала уменьшается по мере осаждения улавливаемой дисперсной фазы на фильтровальном элементе, и для поддержания пропускной способности фильтра в заданных пределах фильтровальный элемент необходимо периодически менять или регенерировать. Таким образом, регенерация – это процесс удаления части пылевого слоя с целью полного или частичного восстановления первоначальных свойств фильтровальной перегородки. На основе теоретического обобщения физико-химических эффектов в пылевых слоях, анализа и синтеза энергетических воздействий разработаны методы интенсификации процесса регенерации пылеулавливающих фильтров. Изучена пневмоимпульсная регенерация рукавного фильтра, на основе чего было получено регрессионное уравнение в безразмерных переменных для определения эффективности регенерации. Показано, что давление импульса оказывает доминирующее влияние на эффективность регенерации. Полученная модель была использована для оценки и прогнозирования эффективности пневмоимпульсной системы регенерации рукавных фильтров на ряде предприятий по производству строительных материалов Воронежской области.

Summary. The regeneration system exercises significant influence on the efficiency and reliability of the filters. During operation of the filter it continuously increases the hydraulic resistance and the gas permeability of the filter material decreases as the deposition of the disperse phase capturable on the filter element, and to maintain the bandwidth of the filter in the filter element within the set must be periodically changed or regenerated. Thus, regeneration of - a process of removing part of the dust layer with the purpose of full or partial reduction of the initial filter partitioning properties. On the basis of theoretical synthesis, physico-chemical effects of dust in layers, analysis of energy effects, developed methods of intensification of the process of regeneration of particulate filters. Pneumopulse regeneration of bag filter has been investigated, and based on it a regression equation for regeneration efficiency has been derived. It has been shown that pulse pressure exerts the dominant influence on the regeneration efficiency. The obtained model was used for assessment and prediction of the efficiency of the pneumopulse system of regeneration of bag filters at a number of structural materials producing enterprises in the Voronezh region

Ключевые слова: очистка газов, очистка газов, фильтрование, моделирование, регенерация.

Keywords: gas purification, filtering, modeling, regeneration.

В процессе эксплуатации фильтра его гидравлическое сопротивление непрерывно возрастает, а газопроницаемость фильтровального материала уменьшается по мере осаждения улавливаемой дисперсной фазы на фильтровальном элементе (рисунок 1), и для поддержания пропускной способности фильтра в заданных пределах фильтровальный элемент необходимо периодически менять или регенерировать. Таким образом, регенерация – это процесс удаления части пылевого слоя с целью полного или частичного восстановления первоначальных свойств фильтровальной перегородки [1, 2].

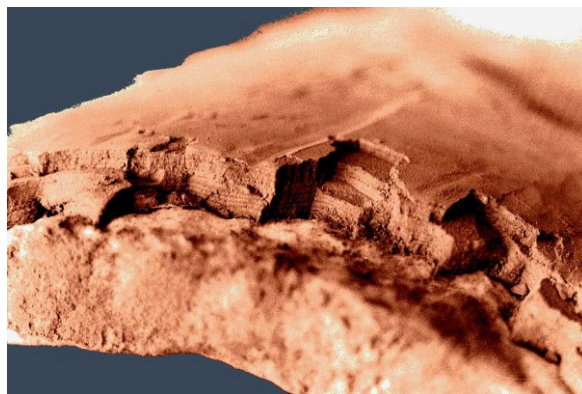


Рисунок 1. Фотография слоя пылевого осадка на поверхности фильтровальной перегородки

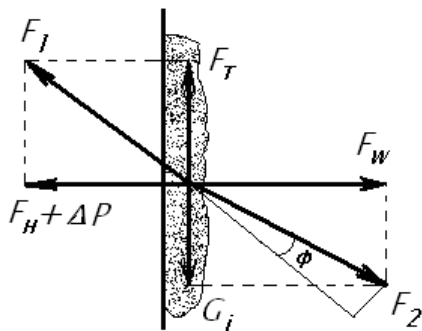
© Панов С.Ю., Белых О.М., Зинковский А.В.,
Момотов В.С., 2015

Независимо от способа регенерации процесс отделения пыли от фильтровальной перегородки можно разделить на три периода. В первом периоде, когда только начинают действовать факторы, способствующие отделению пыли, в слое появляются микротрещины и начинают нарушаться аутогезионные связи; внешне первый период проявляется в незначительном падении гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки. Во втором периоде, когда увеличивается энергия обратной продувки или другие отделяющие факторы, полностью нарушаются аутогезионные связи, пыль отделяется от фильтровальной перегородки, и гидравлическое сопротивление резко снижается.

В третьем периоде, несмотря на увеличение энергии отделяющих факторов, заметного снижения гидравлического сопротивления не происходит, идет нарушение адгезионных связей частиц пыли с фильтровальной перегородкой. В связи с тем, что адгезионные связи значительно сильнее аутогезионных, заметного отделения пыли и снижения гидравлического сопротивления не происходит.

Для обеспечения высокой степени очистки адгезионные связи пыли с фильтровальным материалом не должны нарушаться. При интенсивной регенерации могут иметь место значительные проскоки пыли в первый период процесса фильтрования из-за некоторого снижения пылеотделяющих свойств фильтровальной перегородки. В дальнейшем разница в проскоке пыли уменьшается. Поэтому необходимо удалить столько пыли, чтобы максимально снизить гидравлическое сопротивление фильтра, оставив на приемлемом уровне его пылеулавливающие способности.

Основные закономерности процесса регенерации фильтровального материала рассмотрены на примере пылевого слоя, находящегося на вертикальной поверхности пористой перегородки (рисунок 2).



G_i – вес пылевого слоя, F_H , F_T – нормальная и тангенциальная составляющие адгезионных сил, F_w – сила, возникающая в процессе регенерации, $F_{\Delta P}$ – сила перепада давления на перегородке

Рисунок 2. Схема действия сил на пылевой слой в процессе регенерации

Вес частиц пыли, отрываемых с единицы поверхности фильтровального G_i (Н/м^2) и сила, созданная в процессе регенерации F_w (Н/м^2), стремятся оторвать элемент пыли от фильтровального материала, а сила адгезии в виде нормальной F_H (Н/м^2) и тангенциальной F_T (Н/м^2) составляющих, а также сила давления поступающего газового потока $F_{\Delta P}$ (Н/м^2), удерживают частицы пыли на поверхности перегородки.

При этом сила давления поступающего газового возрастает по мере запыления фильтровальной поверхности.

В данном случае условие отрыва пыли от фильтровальной поверхности имеет зависимость:

$$\cos \varphi [(gG_i)^2 + F_w^2] > F_T^2 + (F_H + F_{\Delta P})^2, \quad (1)$$

где φ – угол наклона векторов F_2 и F_I ; в режиме равновесия $\cos \varphi = 1$

Разделив левую и правую части неравенства (1) на величину $(gG_i)^2$, характеризующую общий вес пыли на пористой перегородке перед ее регенерацией ($G = G_i + G_0$, где G_i – вес удаляемой при регенерации пыли; G_0 – остаточный вес пыли), после преобразования получим:

$$\eta < \frac{1}{g} \left[\frac{F_w^2}{G^2} - \frac{F_T^2 + (F_H + F_{\Delta P})^2}{G^2} \right]^{0.5}, \quad (2)$$

где $\eta = \frac{G_i}{G}$ – показатель, характеризующий эффективность регенерации.

Очевидно, что величина $0 < \eta < 1$. Значение $\eta = 0$ соответствует состоянию, когда вся пыль при регенерации удерживается на поверхности фильтровального материала, а значение $\eta = 1$ соответствует состоянию, когда вся пыль при регенерации удаляется с поверхности фильтровального материала.

Если на фильтровальную перегородку не действует сила давления набегающего потока, т.е. регенерация осуществляется после отключения газового потока, то неравенство (2) приобретает вид:

$$\eta < \frac{1}{g} \left(\frac{F_w^2 - F_T^2}{G^2} \right)^{0.5}, \quad (3)$$

где $F_1^2 = F_T^2 + F_H^2$.

Зависимость (3) показывает неосуществимость регенерации при $F_w < F_T$, и, следовательно, условие эффективной регенерации при отключенном газовой нагрузки имеет вид:

$$F_w > F_1, \quad (4)$$

При наличии газовой нагрузки условие регенерации записывается в виде:

$$F_w > [F_T^2 + (F_H + F_{\Delta P})^2]^{0.5}. \quad (5)$$

Значительное влияние на условия регенерации оказывает одновременное влияние факторов, характеризующих проведение процесса.

Величины, составляющие условие (5), имеют функциональные зависимости (6)-(8).

Сила давления поступающего газового потока, вызванная перепадом давления ΔP на фильтровальной перегородке перед регенерацией:

$$F_{\Delta P} = f(d_3, \bar{d}_m, D, H_{nc}, H_{\phi n}, \omega_{\phi}, z_n, \mu, \rho_c, \rho, \sigma, \tau_{\phi}, \varepsilon_{nc}, \varepsilon_{\phi n}) \quad (6)$$

Сила регенерации, например, применительно к пневмоимпульсному способу очистки:

$$F_{\omega} = f(d_c, D_k, l_c, \omega_c, \omega_{\phi}, L_{\phi}, \tau_{имп}, \mu, \rho, g) \quad (7)$$

Сила сцепления с поверхностью, обусловленная адгезионно-аутогезионными свойствами пыли:

$$F_1 = f(Ha, K_E, \bar{d}_m, \sigma, D, \omega_{\phi}, \mu, \rho_c, \rho, \varphi, \varepsilon_{nc}, \varepsilon_{\phi n}) \quad (8)$$

где d_3 - диаметр элементов фильтровальной перегородки (зерен, волокон); $\bar{d}_m$ - средний медианный диаметр частиц пыли; D - коэффициент диффузии; H_{nc} - толщина слоя пылевого осадка; $H_{\phi n}$ - толщина фильтровальной перегородки; z_n - начальная концентрация пыли; ω_{ϕ} - скорость фильтрования; μ - коэффициент динамической вязкости; ρ_c, ρ - плотность соответственно пыли и газа; σ - среднее квадратичное отклонение логарифма диаметров частиц; τ_{ϕ} - время фильтрования; ε_{nc} - порозность слоя пылевого осадка; $\varepsilon_{\phi n}$ - порозность фильтровальной перегородки; d_c - диаметр продувочного сопла; D_k - диаметр камеры смешения эжектора; l_c - расстояние от продувочного сопла до верхнего среза фильтровального рукава; ω_c - скорость продувочного газа в сопле; ω_{ϕ} - скорость фильтрования; L_{ϕ} - длина фильтровального элемента; $\tau_{имп}$ - продолжительность регенерирующего импульса; Ha - константа Хамакера (для выражения сил Ван-дер Ваальса), K_E - параметр электростатических сил, φ - относительная влажность воздуха.

Процесс регенерации достаточно сложен, число различных факторов достаточно значительно, а степень их влияния на функцию отклика различна. Трудно найти такое сочетание влияющих факторов, при котором одновременно достигаются экстремумы всех функций отклика. Поэтому процесс регенерации оптимизируют при ограничении числа факторов и критериев оптимальности с целью выделения и идентификации доминирующих. Поэтому целесообразно использовать метод планирования экспериментов.

Эффективность регенерации, оцениваемую по снижению аэродинамического сопротивления фильтровального материала, определяли из соотношения:

$$\eta_{рег} = (1 - \Delta P_{\kappa} / \Delta P_n) 100 \%, \quad (9)$$

где ΔP_{κ} - перепад давления на фильтре в конце цикла регенерации, Па; ΔP_n - перепад давления на фильтре перед регенерацией, Па.

Пользуясь анализом размерностей, заменим функцию (3) с учетом (9) зависимостью между критериями подобия. В данном случае число переменных $n=10$, число их единиц измерения (длины, массы и времени) $m=3$. Тогда, согласно π -теореме, число безразмерных комплексов, описывающих процесс, должно быть равно $(n-m)=7$ [3].

В соответствии с π -теоремой, проводя необходимые преобразования, искомая функция представлена в виде соотношения между семью безразмерными комплексами величин, в данном случае - критериями гомохронности, Фруда, Рейнольдса и пятью симплексами геометрического и гидродинамического подобия, т.е. выражение можно представить в виде:

$$\Gamma_1 = a \cdot Ho^i \cdot Fr^{-z} \cdot Re^y \cdot \Gamma_2^c \cdot \Gamma_3^i \cdot \Gamma_4^r \cdot \Gamma_5^k \quad (10)$$

Число Ho , Fr , Re выражается следующими соотношениями:

$$Ho = \frac{\omega_c \cdot \tau_{имп}}{d_c}, \quad Fr = \frac{\omega_c^2}{d_c \cdot g}, \quad Re = \frac{d_c \cdot \rho \cdot \omega_c}{\mu},$$

$$\Gamma_1 = \frac{\Delta p_{\kappa}}{\Delta p_n}; \quad \Gamma_2 = \frac{D_{\kappa}}{d_c}; \quad \Gamma_3 = \frac{l_c}{d_c}; \quad \Gamma_4 = \frac{L_p}{d_c}; \quad \Gamma_5 = \frac{\omega_{\phi}}{\omega_c}$$

- симплексы аэродинамического и геометрического подобия.

Скорость продувочного газа в сопле (ω_c) можно найти из формулы:

$$\omega_c = \frac{Q_c}{f_c}, \quad (11)$$

где Q_c - расход продувочного газа через сопло, м³/с; f_c - площадь сечения продувочного сопла.

Расход продувочного газа через сопло, с допущением о постоянном значении плотности газа в период регенерации [4]:

$$Q_c = \mu_{отв} \cdot f_c \left(\frac{p'_k}{p_T} \right)^{1/K} \cdot p^{-1} \cdot \sqrt{\frac{2K}{K-1} g \cdot p_T \cdot \rho \left[1 - \left(\frac{p'_k}{p_T} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]}, \quad (12)$$

где $\mu_{отв}$ - коэффициент расхода сжатого воздуха через отверстия; K - показатель адиабаты продувочного газа; p_T - полное давление сжатого воздуха в продувочной трубе, Па; p'_k - полное давление в камере очищенного газа, Па.

Параметры, входящие в зависимость (10), изменялись в следующих пределах: перепад давления на фильтре к концу цикла регенерации $\Delta p_{\kappa} = 520 \div 1150$ Па, диаметр продувочного сопла $d_c = 0,008 \div 0,012$ м, расстояние от продувочного

сопла до верхнего среза фильтровального рукава $l_c=0,005\div0,025$ м, диаметр камеры смешения эжектора $D_k=0,025\div0,07$ м, полное давление сжатого воздуха в продувочной трубе $p_T=0,2\div0,4$ МПа. Соответственно Fr , Re , Ho , Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 , Γ_4 и Γ_5 принимали значения $Fr=(4,66\div9,46)10^6$; $Re=(3,86\div6,74)10^5$; $Ho=(1,85\div3,2)10^5$; $\Gamma_1=0,26\div0,58$; $\Gamma_2=2,08\div8,75$; $\Gamma_3=0,417\div3,125$; $\Gamma_4=83,3\div125$ и $\Gamma_5=(3,83\div4,453)10^5$.

Обработка экспериментальных данных позволила получить уравнение регрессии для выполнения конкретных расчетов:

$$\eta_{рег} = 1 - \exp(-3,25 Re^{0.4} Ho^{-0.05} Fr^{0.18} \Gamma_2^{-0.06} \Gamma_3^{0.02} \Gamma_4^{0.07} \Gamma_5^{0.54}), \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что Γ_1 возрастает с увеличением Re , Fr , Γ_3 , Γ_4 , Γ_5 и убывает с увеличением Ho , и Γ_2 , что соответствует существующим представлениям о закономерностях процесса.

Относительное отклонение рассчитанных по формуле (13) и экспериментальных данных для различных диапазонов изменения исследуемых параметров составляет 1,5-22 %, что можно признать удовлетворительным. Примеры поверхностей отклика модели от парного взаимодействия входных параметров приведены на рисунках 3 и 4 [5].

Анализ полученных поверхностей отклика показывает, что доминирующее влияние на эффективность регенерации оказывает давление импульса P_T . Поверхность отклика имеет сложный профиль с локальными максимумами и минимумами, что свидетельствует о наличии оптимальных соотношений взаимозависимых параметров d_c , l_c , D_k .

При регенерации в условиях неотключаемой газовой нагрузки в изменении сопротивления фильтра заметную роль играет скорость фильтрования. Это происходит в результате повышения сопротивления самой фильтро-

вальной перегородки и уплотнения быстрорастущего пылевого осадка.

Сделанные выводы соответствуют существующим представлениям о закономерностях механики аэрозолей.

Полученная модель была использована для оценки и прогнозирования эффективности пневмоимпульсной системы регенерации рукавных фильтров на ряде предприятий по производству строительных материалов Воронежской области.

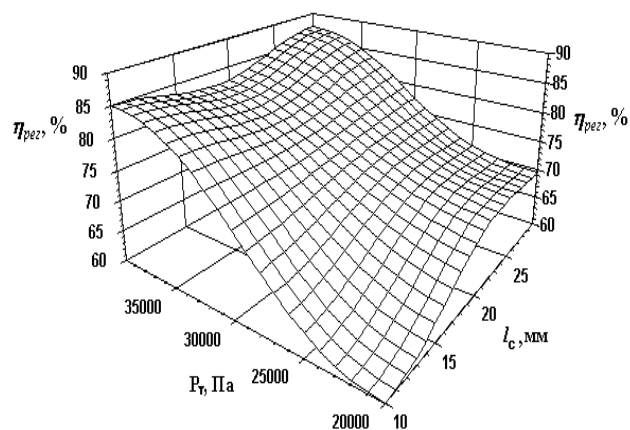


Рисунок 3. Зависимость $\eta_{рег} = f(P_T, l, d_c)$ при $d_c = 8$ мм

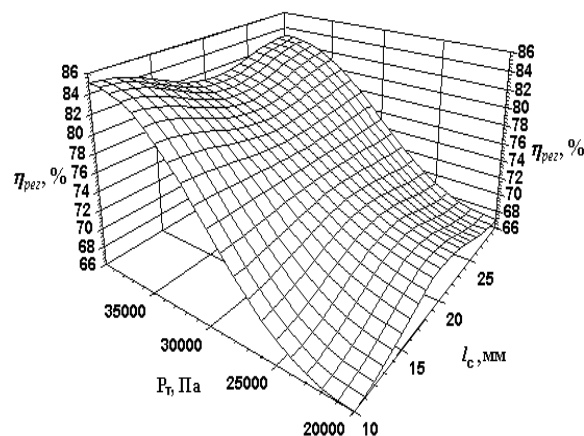


Рисунок 4. Зависимость $\eta_{рег} = f(P_T, l, d_c)$ при $d_c = 10$ мм

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Чекалов Л.В. Экотехника: Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов Холдинговая группа "Кондор Эко - СФ НИИОГАЗ". Ярославль : Русь, 2004. 424 с.
- 2 Швыдкий В. С., Ладыгичев М.Г. Очистка газов. М. : Теплоэнергетик, 2002. 640 с.
- 3 Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. 753 с.

- 4 Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.

- 5 Шаповалов Ю.Н., Красовицкий Ю.В., Русанов А. А. Исследование эффективности пневмоимпульсной регенерации рукавного фильтра // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. №12. С. 27-28.

REFERENCES

1 Chekalov L.V. Ekotekhnika: Zashchita atmosfernogo vozdukha ot vybrosov pyli, aerolei i tumanov [Ecotechnology : Protection of the atmosphere. Air pollution, dust, aerosols and mists holding group "Condor Eco - SF NIIGAS"]. Yaroslavl': Rus', 2004. 424 p. (In Russ.).

2 Shvydkii V. S., Ladygichev M. M. Ochistka gazov [Purification of gases]. Moscow: Teploenergetik, 2002. 640 p. (In Russ.).

3 Kasatkin A.G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii [Basic processes and apparatus of chemical technology]. Moscow: OOO TID "Al'yans", 2004. 753 p. (In Russ.).

4 Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Struinye apparaty [Jet devices]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 352 p. (In Russ.).

5 Shapovalov Yu.N., Krasovitskii Yu.V., Rusanov A.A. Study of the efficiency of pneumatic pulse regeneration filter bag. Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie [Chemical and gas engineering], 2006, no. 12, pp. 27-28 (In Russ.).