



УДК 628.512.002

М.Г. Зиганшин – кандидат технических наук, доцент

А.М. Зиганшин – кандидат технических наук, доцент

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ АВТОСЛОЯ НА ТКАНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ. ЧАСТЬ 2. ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ

АННОТАЦИЯ

Проведены опытные исследования образования автослоя на тканом материале при фильтрации слипающей и слабо слипающей пыли. На базе полученных данных составлены соотношения для определения параметров формирования структуры автослоя и степени осаждения взвешенных частиц.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Фильтрация, опытные исследования, формирование автослоя, полуэмпирическая модель, степень осаждения, взвешенные частицы.

M.G. Ziganshin – candidate of technical sciences, associate professor

A.M. Ziganshin – candidate of technical sciences, associate professor

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

THE HALF EMPIRICAL MODEL OF AUTOLAYER FORMATION ON WEAVING FILTRATIONAL MATERIALS. A PART 2. EXPERIMENTAL RESEARCH OF FILTRATION

ABSTRACT

Experimental investigations of an autolayer formation on fabric material under filtration of sticking and poorly sticking dust are carried. By using of the received data the ratios for definition of autolayer structure parameters formation and of degree of the weighed particles sedimentation are created.

KEYWORDS: Filtration, experimental investigations, autolayer formation, half empirical model, degree of sedimentation, weighed particles.

В данном разделе представлены результаты опытного изучения процессов фильтрации. На их основе решается задача моделирования процесса формирования слоя осаждаемых частиц – автослоя – на тканом фильтрующем материале. От характеристик автослоя зависит степень проскока и эффективность работы фильтра. В существующих моделях изменение параметров системы фильтрации в ходе процесса обычно не учитывают, рассматривая вариант с ничтожно малой концентрацией пыли в фильтрующемся потоке. В приложении к реальным выбросам такой вариант приводит к противоположному эффекту: начальный период становится очень длительным, а образование первичного автослоя с перекрытием ячеек межниточного пространства ткани – процессом, лимитирующим степень очистки. Начальный период может не влиять на фильтрацию при другом крайнем варианте – чрезмерно высокой концентрации взвешенных частиц. Однако на практике этот вариант

не реализуем: автослой может сформироваться очень быстро, но потребуются почти с такой же частотой проводить регенерацию фильтровального материала. На практике реализуются промежуточные варианты, сочетающие те или иные признаки крайних в зависимости от параметров дисперсной части и дисперсионной среды.

Отсев, который, как было установлено в предыдущем разделе, является основным способом удержания частиц промышленной пыли среднего и крупного размера (10-300 мкм) при фильтрации ткаными материалами, представляет собой достаточно сложный процесс. На чистых клетках, образованных нитями и имеющих размер порядка 100x100–200x200 мкм, классифицируются только частицы крупного размера порядка 100-300 мкм (рис. а) и частицы очень мелкого диапазона, непосредственно контактирующие с нитями и волокнами вследствие зацепления, инерции, диффузии, электростатического притяжения (рис. б). Одновременно с этим происходит проскок через клетки частиц размером менее 50 мкм.

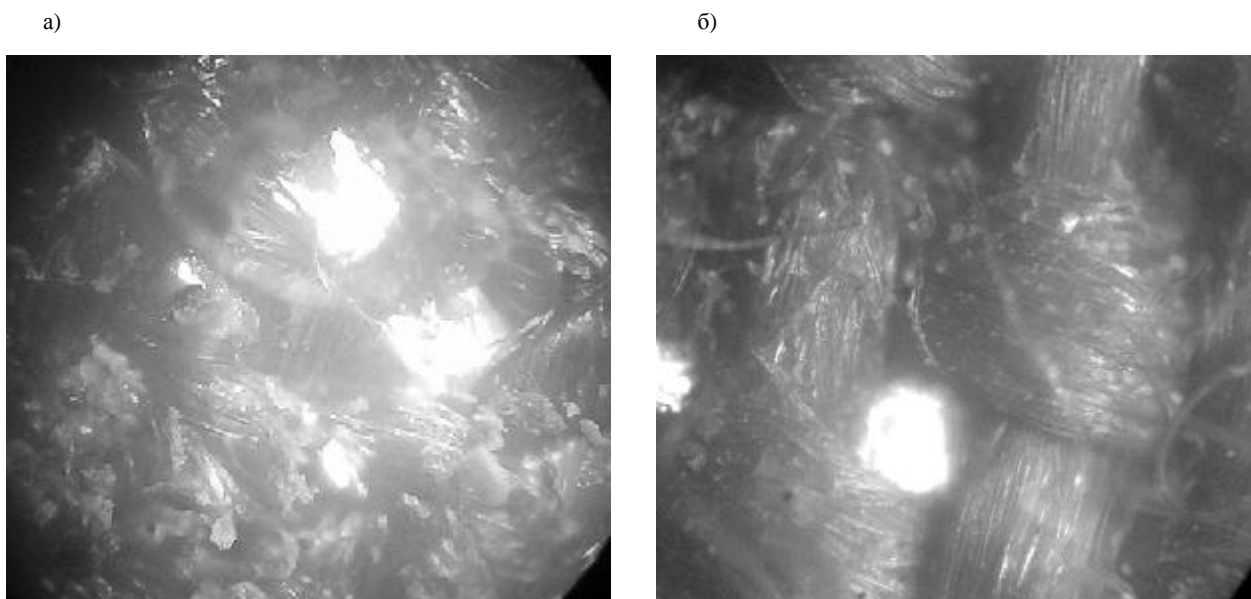


Рис. Фильтрация пыли тканым материалом, начальный период: а – пыль крупная, неслипающаяся; б – пыль мелкая средней слипаемости

Через некоторое время ячейки начинают покрываться частицами пыли. Для перекрытия ячеек с большими просветами необходимо наличие крупных опорных элементов, выходящих в межниточное пространство – осевших частиц или волокон. Мелкие частицы, зацепляясь за опорные элементы и друг за друга, составляют мостики [1], хаотично заполняющие свободное сечение ячейки. Над ними нарастают последующие слои, и формируется первичный пылевой слой, перекрывающий ячейки и часть поверхности ткани – автослой, на котором в дальнейшем происходит осаждение пыли из обрабатываемого потока. По мере продолжения работы плотность ρ и толщина δ автослоя увеличиваются, и сопротивление фильтра растет. Со временем поверхность может быть настолько плотно перекрыта пылью, что из-за высокого перепада давления на фильтре она начнет продавливаться в поры между нитями. Регенерация должна проводиться до наступления такой ситуации.

Начальный размер свободного сечения ячеек и темп их последующего перекрытия являются стохастическими характеристиками. На эффективность осаждения пыли фильтром влияют все стохастические и детерминированные факторы системы. Соответственно этому параметры автослоя (толщина, плотность, проницаемость, укрывистость и др.), будучи стохастическими величинами, являются еще и сложными функциями свойств материала дисперсных частиц. Поэтому для составления нестационарной модели процесса формирования автослоя на тканом материале необходимо использование ряда упрощений и эмпирических данных.

С целью упрощения условно разделяем процесс на 2 этапа – формирования первичного автослоя и его дальнейшего нарастания до останова на регенерацию. Признаком завершения первого этапа будем считать перекрытие ячеек, с сопутствующим ему частичным покрытием поверхности ткани и соответствующим увеличением сопротивления фильтра. На втором этапе с ростом толщины, плотности и снижением проницаемости автослоя перепад давления на фильтре возрастает до величины, при которой система должна быть остановлена на регенерацию. На каждом из этапов масса пыли dm , кг, удаляющаяся вследствие фильтрации за время $d\tau$, с, из потока с постоянным расходом W , м³/с, и концентрациями до и после фильтра C_b , C_e , кг/м³, может быть подсчитана как

$$dm = W(C_b - C_e) d\tau = W \Delta C d\tau. \quad (1)$$

При этом каждому из этапов соответствуют свое характерное время τ и свои параметры процесса. Изменение концентрации пыли в потоке ΔC , кг/м³, зависит от всех факторов, влияющих на эффективность фильтрации пыли. Значение C_b принимается постоянным. Значение C_e , по опытным сведениям, составляет в начале процесса фильтрации при заправке чистой ткани около $0,7C_b$, регенерированной – около $0,3C_b$. В конце процесса формирования автослоя $C_e < 0,1C_b$, а в конце фильтрации перед регенерацией $C_e < 0,005C_b$.

В модели первого этапа процесса фильтрации необходимо отразить характер изменения скорости заполнения пылью свободного сечения ячеек f_{cell}^{fr} , м², на 1 м² поверхности фильтра f_{tot}^{fr} , м², ($F_{cell}^{fr} = f_{cell}^{fr} / f_{tot}^{fr}$, м²/м²)



и, соответственно, живого сечения поверхности фильтра $F^{fr} = F_{cell}^{fr}$, м²/м². В начале процесса фильтрации площадь запыления $F_{cell}^{dust} = f_{tot}^{dust} / f_{tot}$, м²/м², увеличивается медленно вследствие проскока пылинок через ячейки ткани. По мере образования «мостиков» на клетках степень осаждения возрастает, и скорость заполнения пылью ячеек $dF_{cell}^{dust} / d\tau$ увеличивается вплоть до их перекрытия, т.е. до завершения этапа формирования первичной структуры автослоя. До этого момента производная растет с уменьшением площади свободного сечения ячеек

$$F_{cell}^{fr} = F_b^{fr} - F_{cell}^{dust} \text{ м}^2/\text{м}^2, \quad (2)$$

где $F_b^{fr} = (1 - z) F_{cell}$, м²/м² – относительная начальная площадь свободного сечения межклеточных ячеек ткани; z – коэффициент начального заполнения ячеек (волокнами в чистой ткани и «равновесной» запыленностью после регенерации); F_{cell} , м²/м² – номинальная площадь ячеек на 1 м² поверхности фильтра f_{tot} .

Площадь ячеек на 1 м² ткани определяется как $F_{cell} = 100N \cdot b \cdot h$. Количество ячеек N на 0,01 м² ткани, а также расстояния в свету между нитями основы b , м, и утка h , м, рассчитываются по данным о структурных характеристиках соответствующих видов тканей:

$$N = (\Pi_o - 1) \cdot (\Pi_y - 1); b = (0,1 - \Pi_o \cdot d_p) / (\Pi_o - 1) \text{ м}; \\ h = (0,1 - \Pi_y \cdot d_p) / (\Pi_y - 1) \text{ м}, \quad (3)$$

где Π_o , Π_y – плотность ткани по основе и утку, выражаемая числом нитей на 100 мм; $d_p = A\sqrt{T} / 31,6$, м – расчетный диаметр нити; A – коэффициент, который для фильтровальных тканей может быть принят 1,25; $T = M/L$, мг/м – текс нити; M , мг, и L , м – масса и длина нити.

Начальное живое сечение межклеточной ячейки новой ткани составляет в среднем, как показывает изучение различных видов тканых материалов, от 90 % для стеклоткани до 55-80 % для других тканей из натуральных и искусственных волокон. Это позволяет определить начальную площадь свободного сечения

F_b^{fr} и свободный (эквивалентный) размер ячеек как долю их номинального размера. По опытным данным, для новых тканей из натуральных и синтетических волокон, исключая стеклянные, металлические и керамические, можно принимать $z \approx 0,25 \div 0,45$. Для тех же тканей после множества регенераций $z \approx 0,7 \div 0,8$.

До момента завершения образования автослоя в ячейках производная $dF_{cell}^{dust} / d\tau$ изменяется обратно пропорционально $(F_b^{fr} - F_{cell}^{dust})$. Чтобы изменение скорости запыления не зависело от общей площади

фильтрации, для составляемой модели в качестве расходной характеристики используем нагрузку на единицу площади поверхности f_{tot} , м², фильтрующего материала – «скорость фильтрации» W/f_{tot} , м³/(м²с). Принимаем также во внимание стохастический характер процесса осаждения частиц пыли на препятствии. Как было показано в первом разделе работы, преимущественным эффектом осаждения частиц среднего размера при фильтрации на тканых фильтрах является ситовой. В таком случае стохастический характер процесса фильтрации при прочих равных условиях будет проявляться в основном через совокупность сочетаний размеров частиц и ячеек сит. Поэтому в качестве параметров, отражающих стохастичность процесса, в модели используются характеристики дисперсного состава пыли и размер межклеточных ячеек ткани. Дисперсный состав представлен через медианный диаметр частиц D_m и дисперсию u , а размер ячеек – через их эквивалентный диаметр:

$$D_{eq} = \sqrt{bh}, \text{ м}. \quad (4)$$

Введение рассмотренных выше допущений позволяет представить зависимость $dF_{cell}^{dust} / d\tau$ в приближенном к реальному процессу виде. С их учетом математическая модель первого этапа оседания пыли на новой и регенерированной ткани может быть представлена в виде линейного дифференциального уравнения первого порядка

$$\frac{dF_{cell}^{dust}}{d\tau} = \frac{W \Delta C D_m \sigma}{f_{tot} \delta \rho D_{eq}} (F_b^{fr} - F_{cell}^{dust})^{-1}, \text{ с}^{-1}. \quad (5)$$

Соотношение $f_{tot} \delta \rho D_{eq} / (W \Delta C D_m \sigma)$ представляет собой временной параметр первого этапа фильтрации τ_{f1} , с, отражающий влияние на степень осаждения основных характеристик потока, частиц и фильтрующей пористой среды. Он равен времени, которое необходимо для образования автослоя толщиной δ , м, и плотностью ρ , кг/м³, на ячейках размером D_{eq} , м, при изменении концентрации (при движущей силе, концентрационном напоре) ΔC , кг/м³, диспергированных частиц с характеристиками D_m , м, и u , в потоке с расходом W , м³/с, и при нагрузке W/f_{tot} , м³/(м²с). Запишем выражение (5) в виде:

$$dF_{cell}^{dust} / d\tau = 1 / \left[\tau_{f1} (F_b^{fr} - F_{cell}^{dust}) \right]. \quad (6)$$

Пределы интегрирования определяются из условия, что этап формирования первичной структуры автослоя с перекрытием ячеек $F_{cell}^{dust} = F_b^{fr}$ завершается за время τ_1 :

$$\int_0^{F_b^{fr}} (F_b^{fr} - F_{cell}^{dust}) dF_{cell}^{dust} = \int_0^{\tau_1} d\tau / \tau_{f1}; \quad (7)$$



$$\tau_1 = \tau_{f1} (F_b^{fr})^2 / 2 = f_{tot} \delta \rho D_{eq} (F_b^{fr})^2 / (2W \Delta C D_m \sigma). \quad (8)$$

За это время происходит частичное запыление поверхности нитей фильтрующей ткани. Как показывают опытные исследования, площадь запыления f_{is1}^{dust} , м², приходящаяся на 1 м² общей площади ткани ($F_{is1}^{dust} = f_{is1}^{dust} / f_{tot}$), не превышает 0,25. В целом, масса пыли, уловленная на первом этапе, определится как

$$m_1 = f_{tot} \delta \rho (F_b^{fr} + F_{is1}^{dust}), \text{ кг.} \quad (9)$$

Полученные выражения позволяют также определять изменение концентрации пыли в потоке ΔC и степень очистки выбросов для различных моментов времени τ в период с начала фильтрации до перекрытия ячеек автослоем. Расчеты по выражению (8) показывают, что при рекомендуемых [2] скоростях фильтрации от 0,005 м/с для мелких частиц до 0,05 м/с для частиц среднего размера и концентрации менее 10⁻³ кг/м³ время завершения формирования первичной структуры автослоя τ_1 имеет порядок суток и часов. Следовательно, этот этап будет влиять на качество фильтрации в целом и должен учитываться в расчетах. Для крупных частиц (например, пыль процессов деревообработки) или при концентрации загрязнителя более 10⁻³ кг/м³ (например, зола в продуктах сгорания пылевидного топлива, торфа) значение τ_1 имеет порядок минут. Очевидно, в таких случаях необходимости в учете этапа формирования первичной структуры автослоя нет.

На втором этапе, с момента перекрытия ячеек, скорость запыления площади $F_{is2}^{dust} = f_{is2}^{dust} / f_{tot}$, м²/м², поверхности ткани становится приблизительно постоянной ($dF_{is2}^{dust} / d\tau = \text{const}$). В соответствии с данными опытных исследований, приращение массы осаждаемой пыли dm происходит в основном за счет увеличения плотности слоя ρ и нарастания его толщины δ . Ввиду малости прироста толщины слоя и достаточно длинного периода работы фильтров между регенерациями зависимость $\delta = f(\tau)$ без особой погрешности может рассматриваться как линейная. Увеличение плотности автослоя является сугубо стохастической величиной, и зависимость $\rho = f(\tau)$ для тех или иных конкретных случаев может принимать любой вид. Однако при отсутствии внешних полей отсутствуют и процессы, которые могли бы вызвать какие-либо предпочтения при упаковке частиц в автослой. Поэтому наиболее вероятно прямо пропорциональное увеличение плотности слоя ρ в зависимости от τ .

При условии равномерного распределения по поверхности фильтра массу оседающей из потока пыли можно представить как

$$dm = \rho dV = \rho \delta f_{tot} dF_{is2}^{dust} \text{ кг,} \quad (10)$$

где V – объем оседающей пыли, м³; δ – толщина слоя, оседающего на поверхности ткани, м; ρ – плотность осевшего слоя пыли, кг/м³.

С учетом (1)

$$dF_{is2}^{dust} = [W \Delta C / (f_{tot} \delta \rho)] d\tau \text{ м}^2/\text{м}^2 \quad (11)$$

Принимая во внимание пределы интегрирования по площади запыления – от F_{is1}^{dust} до 1, по времени – от τ_1 до τ_2 , где τ_2 – период между регенерациями, с, получим продолжительность второго этапа $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = (1 - F_{is1}^{dust}) f_{tot} \delta \rho / (W \Delta C)$. Здесь временной параметр фильтрации второго этапа τ_{f2} , с, определяется соотношением $f_{tot} \delta \rho / (W \Delta C)$. Это время образования на поверхности фильтровальной ткани автослоя толщиной δ , м, и плотностью ρ , кг/м³, при нагрузке W/f_{tot} , м³/(м²с) и концентрационном напоре в потоке ΔC , кг/м³. Согласно данным проведенных опытных исследований, при одинаковой скорости фильтрации толщина и плотность оседающего слоя δ , ρ в основном зависят от размеров, слипаемости и морфологии пыли. В данной работе испытаниям были подвергнуты пыли средне-мелкие (D_m около 10 мкм) средней слипаемости ($P \approx 250$ Па) и компактной формы (коэффициент формы $\Phi \approx 0,9$), а также крупные (D_m около 50 мкм) неслипающиеся ($P < 100$ Па) и не совсем компактной формы ($\Phi \approx 0,7$), что, в принципе, охватывает большинство видов пылей по указанным свойствам.

Результаты исследований позволяют провести эмпирическую оценку пределов изменения параметров δ , ρ . Плотность с осевшего слоя исследованных видов пылей изменялась в период между регенерациями от 0 начале фильтрации до 0,40 ÷ 0,65 от насыпной плотности ρ_a в конечном состоянии. Толщина слоя пыли также изменяется в процессе от 0 до максимального значения при остановке на регенерацию. По опытным данным, конечная толщина слоя осевшей компактной пыли среднего размера и средней слипаемости имеет порядок 10⁻³ м, причем по объему автослоя частицы распределены неравномерно. Принимая зависимость изменения ρ от времени прямо пропорциональной, можно брать в расчетах ее среднюю величину, которая находится в пределах соответственно от 20 % до 32,5 % ρ_a .

Вместе с тем, из опыта эксплуатации тканевых фильтров известно, что в целом при постоянной нагрузке их сопротивление в период между регенерациями растет приблизительно пропорционально времени работы. Это позволяет упростить задачу и принимать в расчетах среднее значение произведения $\delta \cdot \rho$. Принимая среднюю величину $\rho_m = (0,2 \div 0,325) \rho_a$, кг/м³, и оценочную



величину $\delta_m = 10^{-3}$ м, получим окончательное выражение для расчета продолжительности периода между регенерациями:

$$\tau_2 = (2 \div 3, 25) \cdot 10^{-4} \rho_a f_{tot} (1 - F_{dust}^{dust}) / (W \Delta C) + \tau_1. \quad (12)$$

Таким образом, в результате решения задачи образования автослоя на тканом материале получены выражения, которые позволяют находить основные характеристики, необходимые для рационального конструирования и эксплуатации фильтрационных очистных систем – степень осаждения взвеси и продолжительность периода между регенерациями. В существующих на настоящее время методиках проектирования и контроля систем фильтрации (см., например, [2, 3, 4, 5] и др.) такие расчеты отсутствуют. Требуемые характеристики определяются на практике по паспортам заводов-изготовителей и результатам испытаний систем после их сооружения.

Литература

1. Зиганшин М.Г. Теоретические основы пылегазоочистки. – Казань: КазГАСУ, 2005. – 262 с.
2. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под общ. ред. Русанова А.А. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
3. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справочник. – М.: Металлургия, 1986. – 628 с.
4. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. изд.: В 2-х ч. Ч. 2 / Под ред. Калверта С., Инглунда Г.М. – М.: Металлургия, 1988. – 712 с.
5. Ужов В.Н, Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 392 с.