

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАЗМЕРОВ ЯЧЕЙКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СЕТОК

А.В. Ельчанинов

79068496545@yandex.ru

SPIN-код: 8566-7470

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен вопрос оценки эффективности фильтрации различных сред с помощью проволочных сеток, имеющих микронный размер ячеек, при этом учтена неравномерность распределения потока среды по ячейкам. Показаны преимущества использования фильтровальных сеток. На основе опытных данных, показывающих распределение размеров ячейки, построена интегральная кривая, с помощью которой проведена проверка на нормальность с использованием критерия согласия χ^2 (хи-квадрат). Показана методика получения фильтровальной характеристики сетки, применяемой для оценки эффективности фильтрации с учетом неравномерности расхода через ячейки разного размера. Пример расчета приведен для количественного и массового распределения частиц полидисперсного порошка стиракрила сферической формы.

Ключевые слова

Фильтрация, пористые структуры, сетки с квадратной ячейкой, неравномерность, эффективность фильтрации, размер ячеек, сферические частицы, распределение потока среды

Поступила в редакцию 14.11.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Процесс фильтрации применяется во многих технических системах, работающих с жидкостями и газами. Особую роль фильтрация топлива играет в ракетно-космической и авиационной технике, в которой требуется высокая чистота используемых сред. В качестве фильтровального материала часто применяют проволочные сетки с квадратными ячейками. Высокая прочность данных сеток обеспечивает большую надежность, а варьирование размеров ячейки позволяет получать фильтровальные материалы с широким спектром эффективности, что обеспечивает их применение практически во всех отраслях.

Данные сетчатые структуры применяются не только как фильтровальные элементы, но и для выравнивания потока либо, наоборот, для создания неравномерностей. Подробное описание применений данных сеток приведено в [1–5]. Рассмотрим эффективность фильтрации с помощью таких сеток.

Сопротивление сетки. Сопротивление проволочных сеток невелико и зависит от коэффициента живого сечения сетки ($m = a^2/t^2$, значения a и t указаны на рис. 1) и увеличивается при его уменьшении. Так, для исследуемой сетки 004 (ГОСТ 6613–86) с размером ячейки $a = 40$ мкм и диаметром прутка $d_{\text{пр}} = 30$ мкм $m = 0,326$.

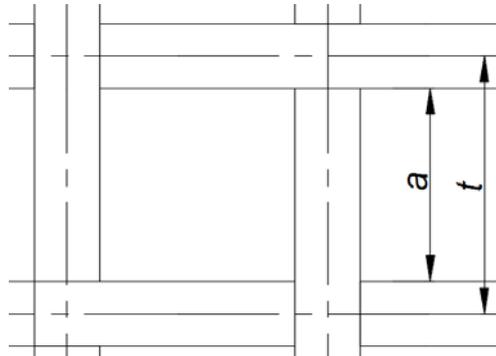


Рис. 1. Сетка с квадратными ячейками

Для сетки с квадратной ячейкой коэффициент ζ в формуле Вейсбаха, выражающей напор h , м, и имеющей вид $h = \zeta \frac{w^2}{2g}$, можно рассчитать по выражению [1]

$$\zeta = \frac{92 - 78m}{Re_a} + 0,7 \cdot (1,05 - m),$$

где $Re_a = wa/v$ — число Рейнольдса ($w = v_{ж}/m$ — скорость истечения между пор; v — кинематическая вязкость текучей среды; $v_{ж}$ — скорость среды на подходе к сетке).

Более точный расчет сопротивлений пористых сетчатых структур приведён в работах [1, 7, 8].

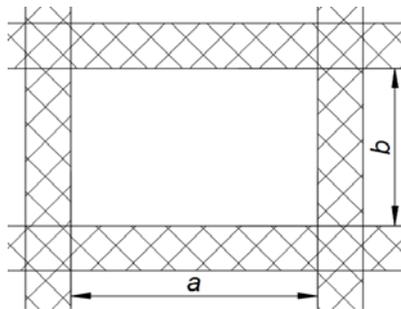


Рис. 2. Действительный вид ячейки

Действительная форма сетки. Данные сетки изготовляют с квадратными ячейками, но поскольку сетки имеют очень маленькие размеры ячеек, даже небольшая погрешность в изготовлении оказывает влияние на эффективность их фильтровальной способности. Технология изготовления такова, что отклонения параллельности прутьев практически отсутствуют, и тогда действительную форму ячейки можно считать прямоугольной.

Поэтому в дальнейшем будем рассматривать два размера ячейки: длину a и ширину b (рис. 2).

После проведения 100 измерений длин сетки с размером ячейки 40 мкм можно выдвинуть гипотезу о нормальном распределении длины ячейки (рис. 3). С помощью критерия согласия χ^2 (хи-квадрат) гипотезу принимают на уровне значимости 0,005 [9].

Как отмечено ранее, действительная форма ячейки — прямоугольник; размер, определяющим фильтровальную способность (определяющий размер),

является наименьший размер ячейки (рис. 4), потому что от него зависит, пройдет частица через ячейку или нет.

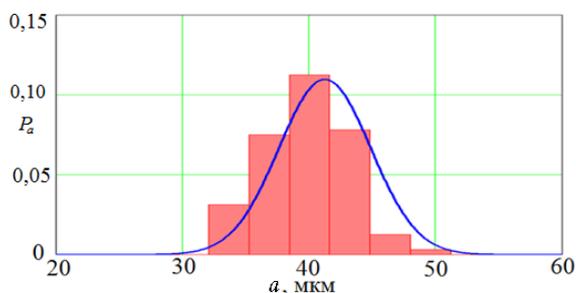


Рис. 3. Проверка нормальности распределения размера

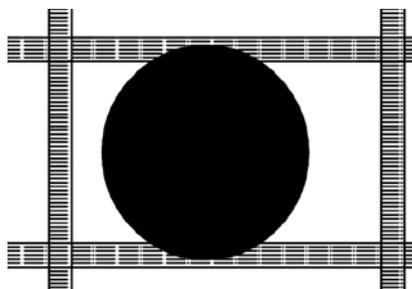


Рис. 4. Условия фильтрования

Для прогноза эффективности сетки сначала необходимо найти распределение наименьших размеров в ячейках. При этом нет необходимости рассматривать каждую ячейку отдельно и измерять наименьший размер. Данное распределение можно получить, зная распределения размеров a и b .

Построение фильтровальной характеристики. Допустим, мы измерили стороны ячеек и построили распределение (рис. 5), где a_i и b_i — середины диаметров разбиения, P_{ai} и P_{bi} — доли соответствующих размеров.

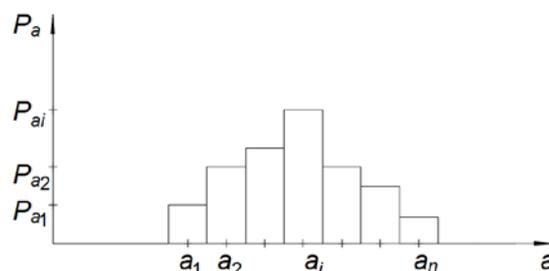


Рис. 5. Распределение размера ячейки

Для определения эффективности необходимо построить распределение наименьших размеров ячеек, в которых определяющим размером является размер a_j . Таким образом, необходимо для каждого размера a_j просуммировать доли P_{bj} , для которых $b_i \geq a_j$ (доля b_i , значение которых больше a_j) и умножить данную сумму на соответствующую долю P_{aj} , т. е. Q_{aj} — доля всех ячеек, в которых размер a_j является определяющим:

$$Q_{aj} = P_{aj} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 0, & b_i < a_j; \\ P_{bi}, & b_i \geq a_j. \end{cases}$$

Если бы рассматриваемая величина была непрерывной, данную операцию можно было бы выполнить в соответствии с выражением

$$Q_a(i) = P_a(i) \int_i^{\infty} P_{bi} di.$$

График распределения определяющих размеров будет располагаться левее графиков распределения каждого из размеров, как показано на рис. 6.

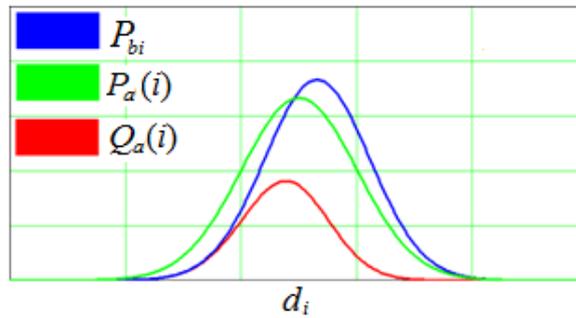


Рис. 6. Переход к определяющим размерам

Аналогичную операцию необходимо выполнить для получения Q_{bi} , но в данном случае при равенстве размеров ячейка не будет учитываться, поскольку ячейки с одинаковыми размерами были учтены в Q_{aj} :

$$Q_{bj} = P_{bj} \sum_{i=1}^n \begin{cases} P_{ai}, & a_i > b_j; \\ 0, & a_i \leq b_j. \end{cases}$$

Частица будет задерживаться сеткой в том случае, если она попадет в ячейку, определяющий размер которой меньше характерного размера частицы, но для нахождения вероятности попадания частицы в такую ячейку необходимо учесть неравномерность расхода. Делаем допущение, что расход через ячейку будет пропорционален ее площади: $V \sim S$.

Для нахождения расхода через ячейки с конкретным характерным размером необходимо определить их площади. Площадь всех ячеек с характерным размером c_i ($c_i = a_i$ либо $c_i = b_i$) можно представить как сумму

$$S_j = Q_{aj} a_j K_{aj} + Q_{bj} b_j K_{bj},$$

где коэффициенты K_{aj} и K_{bj} — суммы соответствующих не характерных размеров, т. е.

$$K_{aj} = \sum_{i=1}^n \begin{cases} 0, & b_i < a_j; \\ (P_{bi} - Q_{bi}) b_i, & b_i \geq a_j, \end{cases} \quad K_{bj} = \sum_{i=1}^n \begin{cases} (P_{bi} - Q_{bi}) b_i, & a_i > b_j; \\ 0, & a_i \leq b_j. \end{cases}$$

Распределение S_j можно считать распределением расходов. Данную характеристику зависимости площади ячеек от их характерного размера будем использовать для определения эффективности сетки.

Определение количества задерживаемых частиц. Дисперсный состав пыли улавливаемых частиц может быть различным, но большинство дисперсных частиц при длительном диспергировании подчиняется логарифмически нормальному закону [10], пример которого изображен на рис. 7.

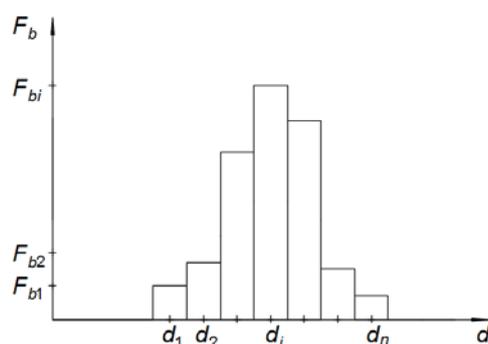


Рис. 7. Распределение пыли по размерам

В случае известных (измеренных) характеристик F_i и S_i можно сделать определить эффективности данной сетки, учитывая неоднородность ячеек, а точнее, изменение распределения F_i после прохождения загрязненного потока данной сетки:

$$A_j = F_j \sum_{i=1}^n \begin{cases} S_i, & c_i > d_j; \\ 0, & c_i \leq d_j. \end{cases}$$

Распределение A_j — распределение загрязнений (пыли) после прохождения сетки, т. е. вероятность прохода частицы равна сумме вероятностей прохождения ее в ячейки с размером, большим ее собственного.

Величины F_i и A_i характеризуют доли количества частиц, но работать с количественными характеристиками не всегда предоставляется возможным, иногда удобнее работать с массовыми долями: $m_q = V_q \rho_q$.

Перевод количественных долей в массовые удобен при сферической форме частиц пыли. Поскольку плотность частиц одинакова и $V_q = \pi d_q^3 / 6$, $F_{mi} = F_i d_i^3$. График распределения сместится вправо, как показано на рис. 8.

После нормирования и повторения операции, аналогичной нахождению A_j , можно определить, какую массовую долю частиц удалит сетка.

Пример прогнозирования. Расчет по данной методике (без учета забивания ячеек) выполнен для полидисперсного порошка стиракрила сферической формы части и сетки, одно из распределений которой представлено на рис. 3.

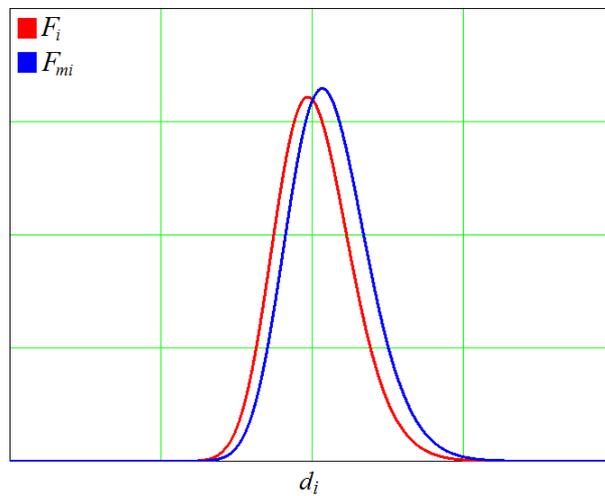


Рис. 8. Изменение распределения размера частиц при переходе от количественного распределения к массовому

По результатам 100 измерений построен график распределения порошка по количеству и массе (рис. 9). После выполнения вышеуказанных действий получаем распределение, показанное на рис. 10.

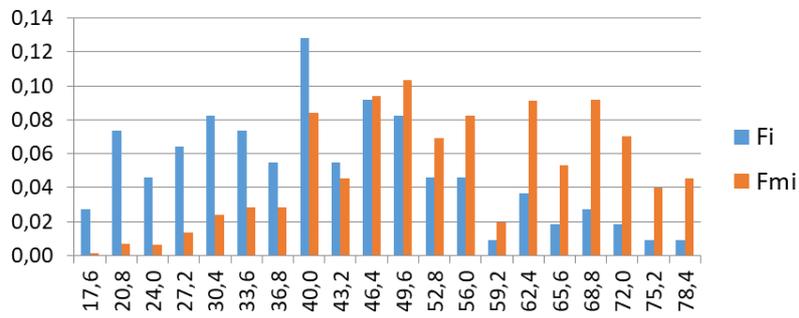


Рис. 9. Распределение полидисперсного порошка

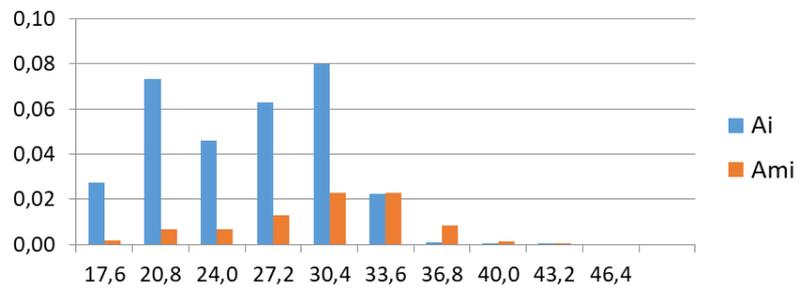


Рис. 10. Изменение распределения порошка после прохождения фильтровальной сетки

Таким образом, можно предположить, что порошок, после прохождения сетки сохранит 31,3 % частиц, которые составляют 8,36 % массы первоначального порошка. С помощью данной методики можно обеспечить подбор фильтровальной сетки на заданную эффективность очистки, спрогнозировать дисперсный состав частиц, прошедших через сетку.

Литература

- [1] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы*. Москва, Металлургия, 1987, 335 с.
- [2] Белянин П.Н., Данилов В.М. *Промышленная чистота машин*. Москва, Машиностроение, 1982, 224 с.
- [3] Белов С.В., Девисилов В.А., Жданов В.Н. Гидравлическое сопротивление тканых металлических сеток. *Химическое и нефтяное машиностроение*, 1989, № 8, с. 26–28.
- [4] Коваленко В.П., Ильинский А.А. *Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений*. Москва, Химия, 1982, 271 с.
- [5] Сидельников Ю.И., Третьяков А.Ф., Матурин Н.И., Колесников А.Г., Панов А.Д., Макарович В.И. *Пористые сетчатые материалы*. Москва, Металлургия, 1983, 63 с.
- [6] Альтшуль А.Д. *Гидравлические сопротивления*. Москва, Недра, 1982, 224 с.
- [7] Девисилов В.А., Спиридонов В.С. Металлические проволочные сетки для фильтрации жидкостей и газов. Часть 1. Структурные характеристики и их расчет. *Безопасность в техносфере*, 2009, № 3, с. 46–54.
- [8] Спиридонов В.С., Новиков Ю.М., Большаков В.А. Эксплуатационные характеристики фильтровальных перегородок из проволочных сеток с ячейками микронных размеров. *Безопасность в техносфере*, 2013, № 6, с. 52–57.
- [9] Зарубина В.С., Крищенко А.П., ред. *Математическая статистика*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 424 с.
- [10] Коузов П.А. *Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов*. Ленинград, Химия, 1974, 279 с.

Ельчанинов Алексей Владимирович — студент кафедры «Экология и промышленная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Спиридонов Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

ESTIMATION OF THE IMPACT OF THE UNEQUAL DIMENSIONS OF THE CELL ON THE EFFICIENCY OF FILTER MESH

A.V. Elchaninov

79068496545@yandex.ru

SPIN-code: 8566-7470

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The issue of evaluating the effectiveness of filtering various media using wire meshes, having micron-sized cells was considered, taking into account the irregularity distribution of the flow of the medium over the cells. The advantages of using filter meshes are shown. On the basis of experimental data showing the distribution of cell dimensions, an integral curve was constructed, which was used to check for normality using the χ^2 (chi-square) compliance criterion. The technique of obtaining the filtering characteristics of the mesh used to assess the effectiveness of filtering is shown, taking into account the uneven flow through the cells of different sizes. An example of the calculation is given for the quantitative and mass distribution of polydisperse powdered spherical acrylic particles.

Keywords

Filtration, porous structures, meshes with a square cell, irregularity, filtration efficiency, cell dimension, spherical particles, distribution of medium flow

Received 14.11.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Belov S.V., ed. Poristye pronitsaemye materialy [Porous materials]. Moscow, Metallurgiya publ., 1987, 335 p.
- [2] Belyanin P.N., Danilov V.M. Promyshlennaya chistota mashin [Industrial purity of machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1982, 224 p.
- [3] Belov S.V., Devisilov V.A., Zhdanov V.N. Hydraulic resistance of woven metal screens. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie*, 1989, no. 8, pp. 26–28. (Eng. version: *Chem. Petrol. Eng.*, 1989, vol. 25, no. 8, pp. 448–452. DOI: 10.1007/BF01156690 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01156690>)
- [4] Kovalenko V.P., Il'inskiy A.A. Osnovy tekhniki ochistki zhidkostey ot mekhanicheskikh zagryazneniy [Fundamentals of liquid purification technique from mechanical impurity]. Moscow, Khimiya publ., 1982, 271 p.
- [5] Sidel'nikov Yu.I., Tret'yakov A.F., Maturin N.I., Kolesnikov A.G., Panov A.D., Makarochkin V.I. Poristye setchatye materialy [Porous grid materials]. Moscow, Metallurgiya publ., 1983, 63 p.
- [6] Al'tshul' A.D. Gidravlicheskie soprotivleniya [Hydraulic resistances]. Moscow, Nedra publ., 1982, 224 p.
- [7] Devisilov V.A., Spiridonov V.S. Metal wire gauzes for filtering liquids and gases. Part 1. Structural characteristics and their calculation. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere], 2009, no. 3, pp. 46–54.
- [8] Spiridonov V.S., Novikov Yu.M., Bol'shakov V.A. Operational characteristics of filtering partitions from wire grids with cells of micron sizes. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere], 2013, no. 6, pp. 52–57.

- [9] Zarubina V.S., Krishchenko A.P., eds. Matematicheskaya statistika [Mathematical statistics]. Moscow, Bauman Press, 2008, 424 p.
- [10] [Kouzov P.A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov [Fundamentals of dispersive analysis of industrial dust and pulps composition]. Leningrad, Khimiya publ., 1974, 279 p.

Elchaninov A.V. — student, Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — V.S. Spiridonov, Professor, Ph.D., Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.