

4. *Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учеб. в 2 кн.* / В. Г. Айнштейн [и др.] // под ред. В. Г. Айнштейна. – М.: Люкс; Высшая школа, 2003. – Кн. 1. – 912 с.

УПРАВЛЕНИЕ ПОРОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В МНОГОСЛОЙНЫХ СЕТЧАТЫХ МАТЕРИАЛАХ

В. М. Капцевич, М. М. Дечко, П. С. Чугаев

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Беларусь, e-mail: dech37106@gmail.com*

Пористые сетчатые материалы, изготавливаемые из тканых проволочных сеток, благодаря организованной структуре обладают стабильными и воспроизводимыми фильтрующими свойствами. Пористые сетчатые материалы применяют при изготовлении фильтроэлементов [1, 2] для очистки жидкостей и газов от механических примесей, а также в системах теплозащиты ракетных двигателей [3]. Кроме того, их используют для создания оболочек турбинных лопаток парогазовых установок и газотурбинных двигателей [4–6], капиллярных заборных установок [7] и др.

Классические сетчатые фильтры, подобно фильтрам с ячеистой структурой, характеризуются прямоточным движением фильтруемого потока жидкости или газа, что снижает эффективность очистки. Для повышения тонкости очистки необходимо уменьшать размер ячейки сетки «в свету», что неизбежно вызывает снижение проницаемости.

Формирование пространственной структуры может управляться взаимным наложением (пакетированием) нескольких сеток. Пакет из нескольких сеток представляет собой некоторую трехкоординатную пространственную структуру, движение газа через которую сопровождается дополнительной турбулентностью.

В зависимости от способа наложения сеток пакетирование может создавать две принципиально различные пространственные структуры.

1. При наложении сеток с сохранением параллельности проволок и их смещением относительно друг друга пористая канальная структура остается однородной: размер и форма сечения прямооточных каналов однородна по всему объему (рис. 1, *a*).

2. При наложении сеток с поворотом на некоторый угол возникает неоднородное порораспределение, состоящее из многоугольных прямооточных каналов различного сечения и размеров (рис. 1, *б, в*).

Рассмотрим пакет из квадратных сеток размерами $n \times n$ ячеек. Длина стороны первой сетки L равна

$$L = nh = n(l + t),$$

где l – сторона квадратной ячейки в свету, мм; t – толщина перемычки, мм; $h = l + t$ – шаг между центрами ячеек.

Накладываемая вторая сетка будет иметь те же геометрические параметры, но при наложении поворачивается на угол α . Центр вращения можно выбирать произвольно.

Рассмотрим наложение, при котором центр вращения совпадает с центральной ячейкой сетки. Такое наложение проще осуществить технологически: относительно этой ячейки можно фиксировать сетки при наложении, нанизывая их на стержень. При наложении поворачиваемой сетки центральное отверстие будет образовывать восьмиугольник (рис. 1, *б*).

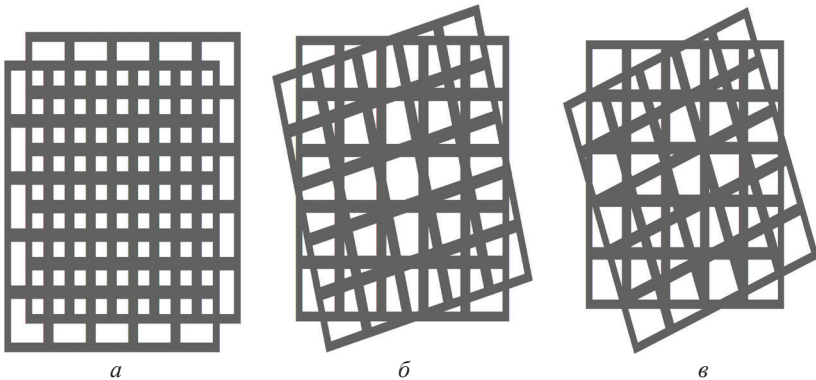


Рис. 1. Наложение двух сеток с параллельным смещением (*a*), вращением относительно центральной ячейки (*б*) или узла сетки (*в*)

Для обеспечения полного перекрытия ячеек на границах первой сетки второй сеткой последняя должна иметь большее количество ячеек n_2 , которое может быть рассчитано по формуле:

$$n_2 = \frac{L}{h} (\sin \alpha + \cos \alpha),$$

где α – угол поворота накладываемой сетки.

Полученное значение округляется до целого в большую сторону и дополнительно может увеличиваться для получения нечетного числа.

Наложение третьей сетки предполагает поворот на дополнительный угол относительно второй сетки. Центральное отверстие в пакете из трех повернутых сеток образует двенадцатиугольник. Остальные ячейки будут образовывать при взаимном пересечении разнообразные по форме многоугольники с числом сторон от трех до двенадцати. В результате этого мы будем получать некоторое неравномерное порораспределение. Для его анализа нами выполнено компьютерное моделирование геометрических параметров сквозных отверстий, получаемых при наложении ячеек трех сеток с различными углами поворота вокруг центральной ячейки, с помощью программы CorelDRAW 2018, в среде которой для автоматизации всех графических преобразований объектов и анализа их геометрических характеристик в MS Excel нами разработана специальная программа на языке MS Visual Basic [8].

Смоделировано наложение трех сеток с различными углами поворота относительно центральной ячейки (рис. 2). Размеры первой сетки выбирались равными 50×50 мм² с четным числом ячеек. Углы поворота накладываемых ячеек варьировали в диапазоне 5–15°.

Для анализа геометрических параметров каждого многоугольника (сквозной поры), получаемого при наложении сеток, рассчитывали значения их площадей S , периметров P , количества сторон образуемых многоугольников N и определяли фактор формы FF :

$$FF = 4\pi \frac{S}{P^2}.$$

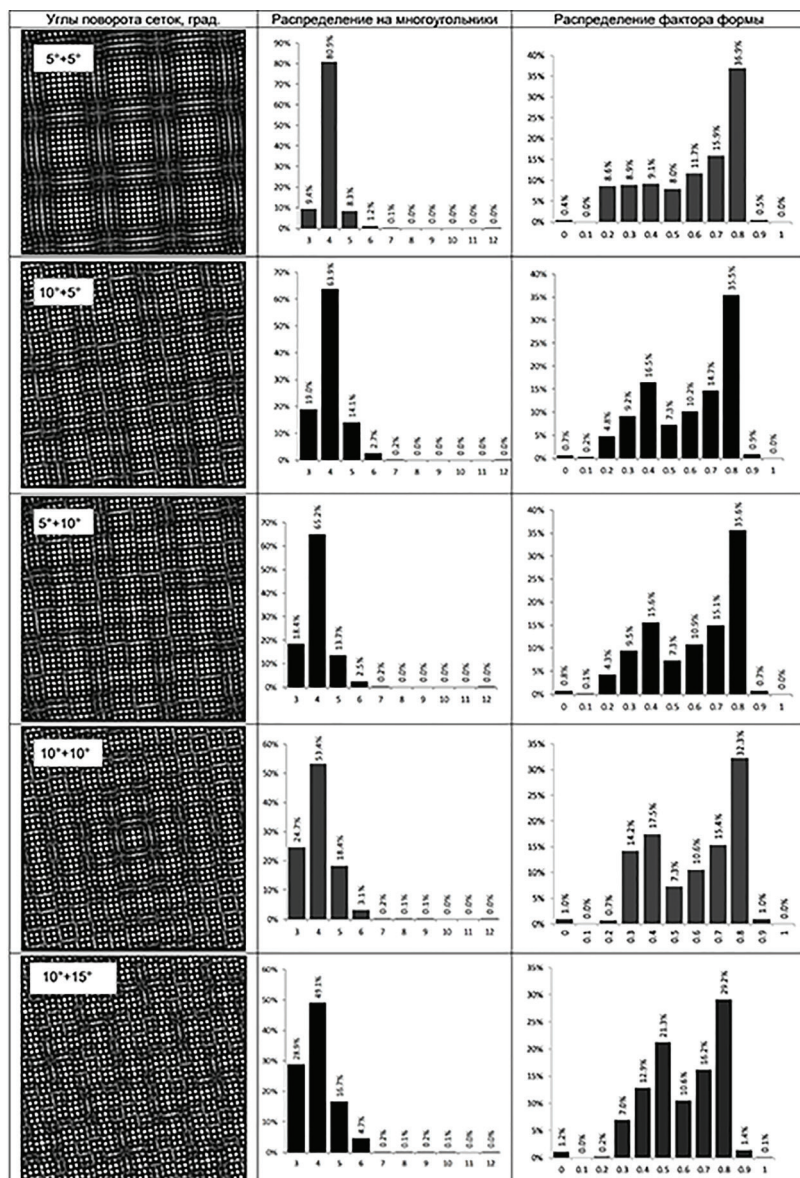


Рис. 2. Влияние углов поворота при наложении сеток на распределение сквозных пор

По результатам построены гистограммы распределения по количеству различных многоугольников и распределения фактора формы FF по размерам.

Как следствие геометрии ячеек, все визуальные картины сквозных пор имеют центральную симметрию относительно точки вращения, а при повороте обеих сеток на одинаковые углы ($5^\circ+5^\circ$, $10^\circ+10^\circ$) – осевую симметрию.

Преобладающими фигурами поровых каналов являются четырехугольники, а вслед за ними треугольники. С увеличением углов поворота доля четырехугольников снижается, а доля других многоугольников увеличивается, но в общем количестве доля фигур со сторонами более шести составляет менее 5 %. Получаемые распределения могут быть с достаточной точностью описаны логарифмически нормальными.

Распределение фактора формы по размерам является многомодальным. Наибольший пик распределения лежит в интервале значений 0,7–0,8. С увеличением углов поворота возникает второй пик распределения в интервале значений 0,4–0,5, а при суммарном угле в 35° проявляется третий пик распределения в интервале значений 0,5–0,6. При этом доля сквозных пор с фактором формы близким к окружности 0,7–0,8 уменьшается с 37 до 29 %, а доля пор с фактором формы 0,4–0,6 возрастает от 17 до 34 %, что коррелирует с уменьшением числа четырехугольных пор за счет роста числа пор с большим количеством сторон.

Как было показано ранее [8], при прочих равных условиях влияние порораспределения по геометрии пор в сетчатом фильтре на скорость фильтрования прямо пропорционально сумме их гидравлических радиусов в четвертой степени $\sum (2S_i/P_i)^4$. Для сетки $\sim 50 \times 50$ мм² с числом квадратных ячеек 39×39 размерами 1×1 мм² и расстоянием между их центрами 1,3 мм, которая описывалась при моделировании, гидравлический радиус ячейки равен $2S/P = 1/2$ мм, а их сумма составит $\sum (2S_i/P_i)^4 = 0,335$ м⁴. Для моделируемых пакетов сеток эта характеристика возрастает наиболее интенсивно при одновременном увеличении углов поворота обеих сеток (см. таблицу).

Влияние углов поворота на суммарный гидравлический радиус

Углы поворота первой сетки	Углы поворота второй сетки	
	5°	10°
5°	0,145 м ⁴	0,148 м ⁴
10°	0,147 м ⁴	0,156 м ⁴

Выводы. На примере сетчатого пакета из трех сеток, смещенных на заданные углы, показана возможность управления сквозным порораспределением многослойных сетчатых материалов, что позволит в дальнейшем прогнозировать проницаемость и тонкость очистки таких материалов.

Литература

1. *Пористые* проницаемые материалы: справ. / С. В. Белов [и др]. – М.: Металлургия, 1987. – 338 с.
2. *Sparks, T. Filters and Filtration. Handbook* / T. Sparks, G. Chase. – Elsevier, 2013. – 444 p.
3. *Эффективность* теплообмена в пористых элементах конструкций жидкостных ракетных двигателей [Электронный ресурс] / Ф. В. Пелевин [и др]. // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 4 (16). – Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/698.html>. – Дата доступа: 24.12.2018.
4. *Experimental investigation of transpiration cooling for sintered woven wire mesh structures* / G. Xu [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Vol. 91. – P. 898–907.
5. *Зейгарник, Ю. А.* Испытания пористого сетчатого материала в качестве оболочки лопаток высокотемпературных газовых турбин / Ю. А. Зейгарник. – М.: Препринт, ОИВТ РАН, 2010. – 64 с.
6. *Bunker, R. S.* Gas turbine cooling. Moving from macro to micro cooling / R. S. Bunker. – Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2013. – 3 p.
7. *Новиков, Ю. М.* Инженерная школа МГТУ им. Н. Э. Баумана: комбинированные пористые сетчатые материалы. Эффективные, безопасные и экологичные изделия на их основе / Ю. М. Новиков, В. А. Большаков // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – № 11. – С. 53–56.
8. *Капцевич, В. М.* Моделирование порораспределения в многослойных сетчатых материалах / В. М. Капцевич, М. М. Дечко, П. С. Чугаев / Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16–18 мая 2018 г. / редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2018. – С. 59–62.