

РАЗРАБОТКА НОВОЙ СТРУКТУРЫ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА С ПОВЫШЕННОЙ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

DEVELOPMENT OF A NEW STRUCTURE OF POROUS MATERIAL WITH INCREASED FILTERING CAPACITY

В.В. КУЛИКОВСКИЙ, Н.В. КИСЕЛЕВ, М.В. КИСЕЛЕВ

V.V. KULIKOVSKIY, N.V. KISELEV, M.V. KISELEV

(Костромской государственный университет,
ООО НПО "Программируемые Композиты")

(Kostroma State University,
NPO Programmable Composites LLC)

E-mail: kylvit@mail.ru; kstu-tpiv@yandex.ru; kisselev50@mail.ru

Приведены исследования фильтрующих свойств существующего аналога материала. Разработана новая структура материала с повышенной фильтрующей способностью. Построены математические модели фильтрации в исследованных материалах с применением пакета ANSYS CFX. Теоретически доказано увеличение фильтрующей способности нового фильтрационного материала в 4 раза выше существующего аналога.

Researches of filtering properties of the existing analog of a material are resulted. A new structure of the material with increased filtering capacity has been developed. Mathematical models of filtration in the studied materials using ANSYS CFX package are constructed. Theoretically, the increase in the filtering capacity of the new filtration material is 4 times higher than the existing analogue

Ключевые слова: структура материала, фильтрующая способность, математическое моделирование.

Keywords: material structure, filtering capacity, mathematical modeling.

Увеличение численности населения Земли, развитие промышленных технологий, повышение их производительности неизбежно приводят к глобальной проблеме загрязнения окружающей среды. Поэтому в современном мире решению данной задачи посвящено большое количество исследований, основным направлением которых является очистка загрязненных газовых и жидких сред с помощью фильтрующих материалов [1...3]. Задачи фильтрации жидкости и газов различны, но в данной статье мы затронем только задачу механической очистки жидкости от присутствующих в ней частиц загрязнения. При этом фильтрующая способность материала, со-

вершенно очевидно, определяется его структурой [4]. Выбор данной структуры и ее параметров будет зависеть от технических требований на степень очистки фильтруемой среды, поэтому для их обоснованного выбора актуально создавать теоретические модели фильтрации сред, чтобы с их помощью выполнять исследование поведения моделей и определять оптимальный вариант структуры. Собственно говоря, виртуальное проектирование – это задача, которая стоит сейчас перед нашим обществом в рамках программы "Цифровая экономика", где в дорожной карте "новых производственных технологий" определена субтехнология "математическое моделиро-

вание", парадигмой которой является создание цифровых двойников (Digital Twin), которые позволят сразу за 1 итерацию получить результат проектирования, адекватный натурным испытаниям [5].

Для фильтрации жидкости обычно применяют нетканые материалы со случайной структурой волокон или пористые среды с различной величиной пор [6]. Однако для промышленных целей при больших давлениях, скоростях фильтрации и размерах загрязнений применение нетканых материалов практически исключается вследствие их малой жесткости на сжатие или из-за механических повреждений. Примерами таких процессов являются фильтрация на выходе из газовых и нефтяных скважин, высоконапорные магистрали в установках высокого давления и др. В данной работе предлагается новая структура пористого материала для фильтрации жидкости. Разработанная новая структура материала сравнивалась с имеющимся на сегодняшний день решением задачи, полученным Институтом композиционных материалов (ИКМ) в Украине (г. Харьков) [7]. Для исследования структуры имеющегося волокнисто-пористого конструкционного фильтрующего материала (ВПКФМ) использовался метод компьютерной томографии (рис. 1 – фрагмент структуры существующего фильтра

ВПКФМ по данным компьютерной томографии).

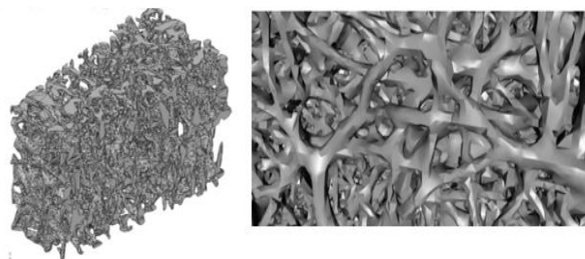


Рис. 1

Изучив технологию производства данных материалов (ВПКФМ), был сделан вывод, что она приводит к нерегулярному, случайному распределению размеров и форм пор материала по его объему. Нерегулярный характер структуры фильтрующего материала является негативным фактором, который не позволяет детерминированно точно управлять процессом фильтрации для достижения заданной эффективности фильтрации жидкости или газа.

Для оценки фильтрационных свойств существующего материала (ВПКФМ) были вырезаны два образца – "представительских объема материала" (рис. 3), которые в достаточной степени представляют его структурные особенности. Геометрические характеристики образцов представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

| № образца | Размеры образца, мм | Объем, мм ³ | Пористость | Удельная поверхность, мм ² /мм ³ |
|-----------|---------------------|------------------------|------------|--|
| 1 | 3,08 x 2,70 x 3,63 | 30,19 | 0,49 | 9,6 |
| 2 | 3,70 x 2,80 x 3,66 | 37,91 | 0,794 | 2,47 |

Согласно теории гомогенизации, исследование свойств в небольшом "представительском объеме" материала можно распространить и на свойства всего изделия в целом для дальнейших расчетов. Применение данной теории предполагает, что существенного различия в его структуре по объему всего материала не будет, что соответствует условиям рассматриваемой задачи.

Дальнейшее исследование фильтрации жидкости в существующем и предлагаемом новом материале выполнялось с помощью методов математического моделирования –

методом конечных элементов в среде ANSYS CFX.

Через представительский объем материала пропускался сквозной поток воды с температурой 20 С и скоростью на входе 1,5 см/с. Течение считалось изотермическим, режим – ламинарным, поскольку, по данным пробных просчетов, число Рейнольдса не превышало 200. Во входном сечении моделировалось присутствие твердых частиц загрязнений в количестве 2000 частиц в секунду, равномерно распределенные по площади с плотностью 6000 кг/м³.

Размеры частиц подчинялись нормальному распределению со средним диаметром 40 мкм, максимальным диаметром 100 мкм, минимальным диаметром 1 мкм и стандартным отклонением 20 мкм. Боковая поверхность областей считалась непроницаемой стенкой. Для взаимодействия частиц со стенками использована модель Зоммерфельда-Франка со средней высотой неровностей 20 мкм, длиной 10 мкм и стандартным отклонением по высоте 5 мкм.

Для ламинарного режима течения в ANSYS CFX реализована модель взаимодействия частиц со стенками, основанная на задании коэффициентов восстановления при ударе в направлениях параллельно и перпендикулярно стенке. При отсутствии соответствующих данных эти коэффициенты полагались достаточно малыми (0,01), что практически означает потерю скорости частицы при попадании в неподвижный слой у стенки. Затем частица может вернуться в поток или остаться на стенке в зависимости от расположения стенки относительно направления силы тяжести. Задача решалась как нестационарная, шаг по времени составлял от 5 до 20 мс. Время процесса фильтрации составляло 2 с, что достаточно велико по сравнению со временем прохождения частицы через ячейку фильтра (около 0,25 с).

На рис. 2 приведены результаты расчета распределения частиц в порах фильтра из волокнисто-пористого материала – ВПКФМ.

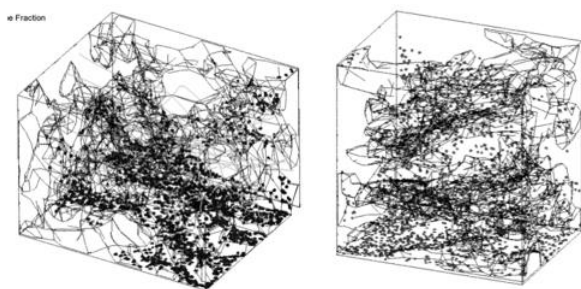


Рис. 2

Анализ распределения частиц на рис. 2 показывает, что траектории частиц отклоняются вниз, и частицы под действием гравитации постепенно оседают на поверхности пор, обращенные вверх, а также на дно

образца. При этом действие сил инерции сказывается в меньшей степени, поскольку траектории частиц имеют относительно малую кривизну. По результатам моделирования у образца №1 через фильтр проходят 45,3% частиц, у образца №2 – 32,6%, что объясняется большей пористостью и соответственно меньшей средней скоростью воды, что способствует лучшему осаждению частиц.

Результаты расчетов фильтрующей способности фильтрующих элементов приведены в табл. 2 (сравнительная характеристика коэффициентов пропускания).

Т а б л и ц а 2

| Структура фильтра | Коэффициент пропускания частиц загрязнения, % |
|-------------------|---|
| Образец №1 | 45,3 |
| Образец №2 | 32,6 |

На основе выполненных исследований и полученных результатов предложена новая структура фильтрующего материала, представляющая последовательно расположенные осадочные камеры в форме параллелепипедов, разделенные стенками с отверстиями. При этом вход и выход из камеры разнесены на достаточное расстояние, чтобы сформировать поток, где скорость резко изменяется по величине и направлению. В камерах, при падении скорости, должно происходить оседание частиц под действием силы тяжести, а при резком повороте потока силы инерции должны отбрасывать частицы на стенку. Таким образом, структура представляет комбинацию инерционных фильтров с осадочными камерами [8].

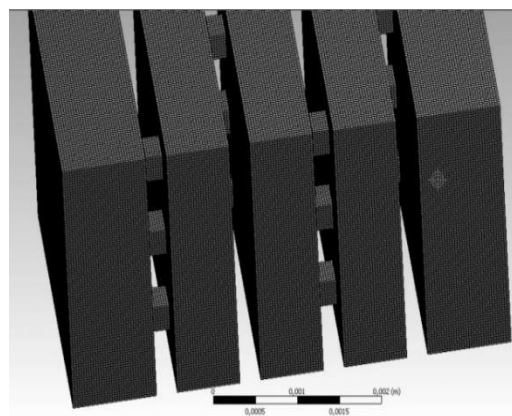


Рис. 3

Пример геометрической модели структуры полостей такого фильтра (пористость 0,81, удельная поверхность $2,64 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$) с сеткой конечных элементов представлен на рис. 3. Модель включает 2,1 млн. узлов.

Результаты расчетов данной конструкции фильтра, при граничных условиях решения задачи, аналогичных приведенным выше, представлены на рис. 4 (траектории частиц в предлагаемой структуре фильтра: а) – вид слева; б) – вид сверху).

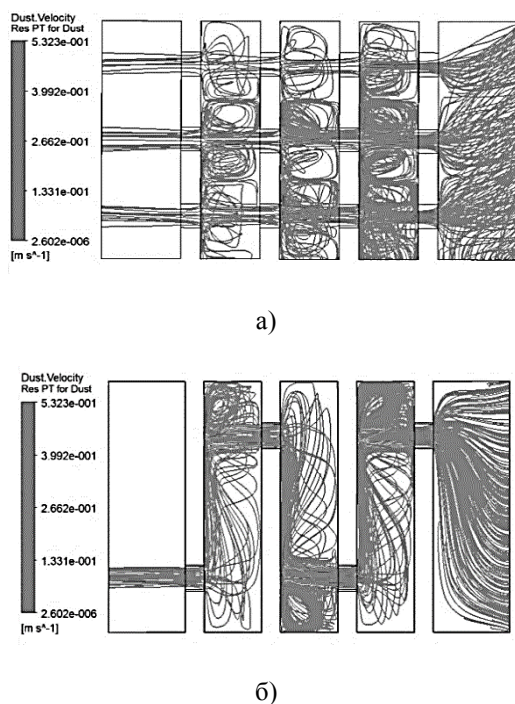


Рис. 4

Расчетные траектории частиц загрязнений в данной структуре, показанные на рис. 4, позволяют сделать вывод о том, что интенсивность оседания частиц по ходу потока жидкости увеличилась. Действительно, в данной структуре фильтра, по расчету, после фильтра проходит лишь 10,7% частиц.

Недостатком данной структуры является повышенное гидравлическое сопротивление, которое составило 570 Па, в то время как для существующей структуры волокнисто-пористого материала оно в среднем для образцов составляло около 6 Па. Однако при расчете варианта фильтра предлагаемой структуры с увеличенным проходным сечением межкамерных отверстий оказалось, что при пропускании 24,7%

частиц его сопротивление составило 31 Па. Это значит, что с уменьшением гидравлического сопротивления фильтра увеличивается пропускание частиц и расход жидкости.

При сопоставлении эффективности рассмотренных структур фильтрующего материала следует учитывать и то, что, за счет более высокой пористости, предлагаемая новая конструкция фильтра позволяет снизить расход материала. Неоспоримым преимуществом предлагаемой конструкции является возможность точного регулирования фильтрующей способности материала за счет детерминированного задания размеров геометрии его структурных элементов, в отличие от рассмотренного аналога.

Проектирование структуры фильтрующих материалов и размеров конструктивных элементов должно производиться исходя из конкретных технических требований на изделие.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен расчет фильтрующей способности структуры волокнисто-пористого материала из ВПКФМ и новой предлагаемой структуры фильтрующего материала.

2. Предложена новая структура фильтрующего материала с теоретической эффективностью фильтрации почти в 4 раза выше имеющегося аналога.

ЛИТЕРАТУРА

1. Очистка сточных вод - методы и специальное оборудование. (2017) [электронный ресурс] - Режим доступа. - URL: <http://strmnt.com/dom/comm/d-water/ochistka-stochnyx-vod.html>.
2. Зарецкая В.Ю., Юлтыева Ю.С. Виды загрязнения воды и способы ее очищения, основанные на физических явлениях // Молодой ученый. – 2016, №9.1. С. 30...31.
3. Береснев А.В., Котлярова В.В. Загрязнение природных вод и способы их очистки // Научно-методический электронный журнал "Концепт". – 2017. Т. 39. С. 776...780.
4. Фандеев В.П., Самохина К.С. Методы исследования пористых структур // Интернет-журнал "НАУКОВЕДЕНИЕ" Том 7, №4 (2015). Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/34TVN415.

5. Киселев М.В., Померанцев М.А., Куликовский В.В. Геометрическая модель структуры фильтрующих пористых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 2. С.210...213.

6. Кравцов А.Г., Марченко С.А., Зотов С.В., Станкевич В.М., Наумов А.Д. Полимерные волокнисто-пористые фильтрующие материалы / Под общ. ред. Ю.М. Плескачевского. – Гомель: БелГУТ, 2012.

7. Аналитический портал химической промышленности. Харьковские инновации в области нетканых материалов. Режим доступа.-URL: https://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=6761&cat_id=8&page_id=5.

8. Куликовский В.В., Киселев М.В., Киселев Н.В. Разработка структуры волокнисто-пористых материалов с повышенной фильтрующей способностью // Сб. мат. XXI Междунар. науч.-практ. форума: Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2019), 25 – 27 сентября 2019 г. – Иваново: ИВГПУ, 2019. С.227...233.

REFERENCES

1. Ochistka stochnykh vod - metody i spetsial'noe oborudovanie. (2017) [elektronnyy resurs] - Rezhim dostupa.-URL: <http://strmnt.com/dom/comm/d-water/ochistka-stochnyx-vod.html>.

2. Zaretskaya V.Yu., Yul'tyeva Yu.S. Vidy zagryazneniya vody i sposoby ee ochishcheniya, osnovannye na fizicheskikh yavleniyakh // Molodoy uchenyy. – 2016, №9.1. S. 30...31.

3. Beresnev A.V., Kotlyarova V.V. Zagryaznenie prirodnykh vod i sposoby ikh ochistki // Nauchno-

metodicheskiy elektronnyy zhurnal "Kontsept". – 2017. T. 39. S. 776...780.

4. Fandeev V.P., Samokhina K.S. Metody issledovaniya poristykh struktur // Internet-zhurnal "NAUKOVEDENIE" Tom 7, №4 (2015). Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf> (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana. Yaz. rus., angl. DOI: 10.15862/34TVN415.

5. Kiselev M.V., Pomerantsev M.A., Kulikovskiy V.V. Geometricheskaya model' struktury fil'truyushchikh poristykh materialov // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2018, № 2. S.210...213.

6. Kravtsov A.G., Marchenko S.A., Zotov S.V., Stankevich V.M., Naumov A.D. Polimernye voloknisto-poristye fil'truyushchie materialy / Pod obshch. red. Yu.M. Pleskachevskogo. – Gomeľ: BelGUT, 2012.

7. Analiticheskiy portal khimicheskoy promyshlennosti. Khar'kovskie innovatsii v oblasti netkanykh materialov. Rezhim dostupa.-URL: https://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=6761&cat_id=8&page_id=5.

8. Kulikovskiy V.V., Kiselev M.V., Kiselev N.V. Razrabotka struktury voloknisto-poristykh materialov s povyshennoy fil'truyushchey sposobnost'yu // Sb. mat. XXI Mezhdunar. nauch.-prakt. foruma: Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkie tekhnologii i materialy (SMARTEX-2019), 25 – 27 sentyabrya 2019 g. – Iva-novo: IVGPU, 2019. S.227...233.

Рекомендована Научно-техническим советом ООО НПО "ПК". Поступила 03.03.20.