

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКИХ СРЕД ЧЕРЕЗ ФИЛЬТРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ С ОРТОТРОПНОЙ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ ТКАНЫХ СЕТОК

И. Н. Черняк¹, А. Р. Кусин¹, В. М. Капцевич²,
Р. А. Кусин², Н. В. Рутковская², Д. В. Шамаль³

¹Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,
ул. Платонова, 41, 220005, г. Минск, Беларусь, e-mail: nil23niirt@iit.by

²Белорусский государственный аграрный технический университет,
пр-т Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь, e-mail: 19081877@mail.ru

³ООО «3d системы», ул. 3-я Щорса, д. 9, пом. 57, офис 707/3, 220069, г. Минск, Беларусь, e-mail: info@additive.by

Поступила 12.07.2021 г.

Проведены на модельных образцах, изготовленных с помощью аддитивных технологий, предварительные исследования процесса фильтрации жидких сред через фильтрующие материалы с ортотропной структурой на основе тканых сеток (ФМТС). Установлено, что начальная стадия процесса фильтрации характеризуется ламинарным режимом течения среды через ФМ (имеет место прямолинейная зависимость пропускной способности от перепада давления на образце), а тонкость фильтрации определяется характеристиками исходной тканой сетки (диаметра проволоки). При этом тонкость фильтрации не обусловлена размером ячейки в свету. Сделан вывод о перспективах применения метода 3D-печати в дальнейшем для изготовления оснастки для исследования свойств фильтрующих материалов.

Введение. Техника и оборудование современных предприятий не могут обойтись без очистки жидких и газообразных сред фильтрующими материалами (используемыми в процессе производства продукции или в качестве предметов потребления), основным назначением которых является очистка жидкостей или газов от посторонних примесей. Наиболее распространенным способом очистки является фильтрация через пористые проницаемые перегородки, изготовленные из различных фильтрующих материалов (ФМ) [1–4].

Одними из широко применяемых на практике являются сетчатые фильтрующие материалы (СФМ) на основе металлических проволочных сеток. Они характеризуются высокой прочностью и проницаемостью, стабильностью пористой структуры, исключая миграцию частиц ФМ в очищаемую среду, высокой термостойкостью, способностью к многократной регенерации [5, 6]. Высокой производительностью по сравнению с другими СФМ отличаются тканые металлические сетки (ТМС) с квадратными ячейками. Существенным недостатком таких

СФМ является невысокая грязеемкость из-за того, что при их практическом использовании реализуется метод не глубинного, а поверхностного фильтрования. Из-за этого фильтрующие элементы (ФЭ) из СФМ необходимо часто заменять или регенерировать [7, 8]. При этом процесс регенерации затруднен, полностью удалить все застрявшие в ячейках частицы загрязнений не удастся, сами ячейки подвержены деформации. Однако, применяя простые конструкторско-технологические решения, можно с использованием СФМ создавать новые ФМ, работающие в режиме глубинного фильтрования, с помощью которых возможно реализовывать многостадийную очистку жидкостей и газов и которые практически полностью можно очистить от задержанных частиц загрязнений в процессе регенерации. Такие ФМ можно получить простым пакетированием (укладкой стопкой) сеток с квадратными ячейками, когда проволоки основы и утков расположены соответственно одна над другой [9, 10]. Фотография структуры такого материала приведена на рис. 1, при этом структуру мы можем назвать ортотропной, поскольку очевидно,

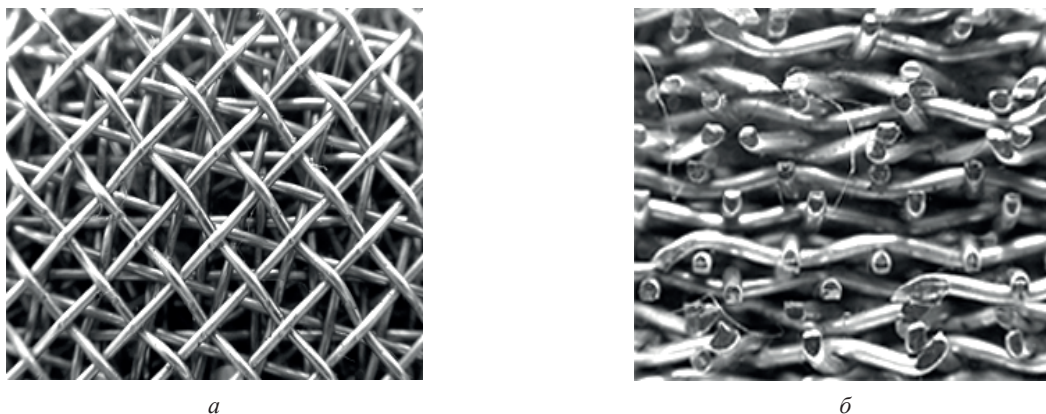


Рис. 1. Структура СФМ в направлении, перпендикулярном плоскости укладки сеток (а), и в направлении, параллельном плоскости укладки сеток (б)

что в двух взаимноперпендикулярных направлениях существенно отличаются как поры (соответственно, тонкость очистки), так и пропускная способность (коэффициент проницаемости).

Однако в литературе отсутствуют работы, посвященные исследованию процесса фильтрации через ФМТС.

Цель настоящей работы – изучение основных закономерностей процесса фильтрации жидких сред через ФМТС с использованием 3D-печати для изготовления экспериментальных образцов.

Материалы и методики исследований.

Для изготовления образцов с целью сокращения объема работ были применены 3D-моделирование и 3D-печать. Образцы изготавливали на 3D-принтере модели «Uniz SLASH 2» из полимерного материала марки – фотополимер «Dentifix-3D Modelling HR» с различными параметрами исходных сеток (диаметра проволоки и размера стороны ячейки в свету).

Для изучения закономерностей процесса фильтрации жидких сред через ФМТС исследовали взаимосвязь размеров пор, тонкости фильтрации, коэффициента проницаемости от характеристик тканых сеток (диаметра проволоки и размера ячеек в свету) и толщины фильтрующего слоя. Размеры пор определяли методом вытеснения жидкости по ГОСТ 26849-86. Коэффициент проницаемости определяли по ГОСТ 25283-93. Анализ размеров твердых частиц, прошедших через образцы, осуществляли с помощью компьютерного микроскопа, изготовленного ЧНПУП «Спектравтоматкомплекс» (Республика Беларусь) на базе микроскопа «Микмед-6», предназначенного для исследования объектов в проходящем свете (рис. 2) [11].

Микроскоп был дооснащен цифровой видеокамерой типа DCM 320, работающей совместно с персональным компьютером. Кроме того, он был дооснащен спектральным осветителем высокого контраста типа ОС-16 ЦОМ с устройством управления режимами осветителя. Осветитель позволяет подсвечивать объекты в видимом спектре, обеспечивая высокую равномерность (6 %) поля подсветки. Конструкция осветителя (освещение микрообъекта) исключает посторонние засветки (блики), что значительно улучшает качество воспроизводимого изображения. Компьютерный микроскоп имеет высокую разрешающую способность и контрастную чувствительность, а именно: позволяет наблюдать слабоконтрастные микрообъекты на дисплее с увеличением до 3000 раз (разрешение не хуже 300 нм) и с контрастом воспроизводимого изображения не менее 80:1.

Измерения структурных параметров суспензий осуществляются на копиях микроизображений, предварительно сохраненных в базе данных компьютерного микроскопа. Для опре-

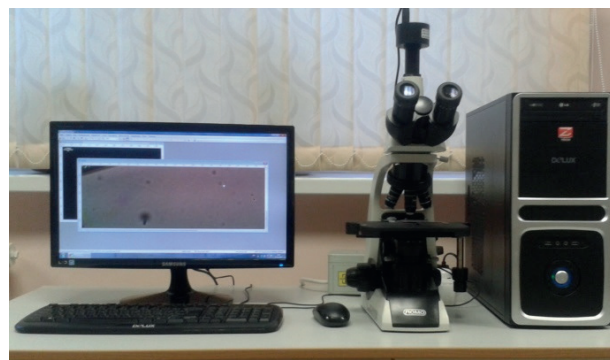


Рис. 2. Компьютерный микроскоп на базе микроскопа «Микмед-6»

деления размеров отдельных структурных элементов (частиц) или расстояний между ними на микроизображения наносятся измерительные линии, которые, соответственно, пересекают эти элементы в выбранных направлениях или соединяют их между собой. При этом автоматически фиксируются значения измеряемых размеров или расстояний. Для измерения площади отдельных структурных элементов (частиц) на микроизображения наносятся измерительные контуры этих элементов. При этом также автоматически фиксируются значения измеряемых площадей.

В данной работе компьютерный микроскоп применялся для определения размеров отдельных твердых частиц в воде, прошедших через экспериментальные образцы. Для этого чистую воду, загрязненную частицами кварцевого песка с размерами от 40 до 2000 мкм, пропускали через экспериментальные образцы, затем отбирали пробы воды и исследовали по приведенной выше методике.

Результаты и их обсуждение. Как отмечено выше, с целью сокращения объема работ при изготовлении образцов были применены 3D-моделирование и 3D-печать. Образцы изготавливали с «упорядоченной» структурой (ячейки строго располагались одна над другой). Размерные характеристики изготовленных образцов приведены в табл. 1. Схематичное изображение экспериментального образца ФМТС в виде трех проекций представлено на рис. 3. 3D-модель одного слоя экспериментального образца из тканой сетки приведена на рис. 4. Моделирование и печать образцов проводили в три этапа. Сначала изготавливали сами ФМТС с герметизацией по контуру на границе с оснасткой путем неразъемного соединения с частью корпуса оснастки (рис. 5), затем изготавливали вторую часть корпуса для подвода технологических сред и подключения к манометру и склеивания оснастки (рис. 6).

Затем образцы подключали к соответствующему стенду и определяли вышеперечислен-

Таблица 1. Размерные характеристики образцов

Номер образца	Диаметр проволоки, d , мм	Размер ячейки в свету, l , мм	Длина поперечного сечения L , мм	Число слоев сеток в образце, n	Число ячеек в направлении фильтрации, n	Ширина поперечного сечения L_1 , мм
1	0,25	1,0	6,5	20	5	10
2	0,25	1,0	1,5	20	1	10
3	0,25	1,0	4,5	20	3	10
4	0,25	1,0	10,25	20	8	10
5	0,25	1,0	15,25	20	12	10
6	0,5	2,0	13,0	14	5	14
7	1,0	2,0	16,0	10	5	20
8	2,0	5,0	29,0	6	5	24

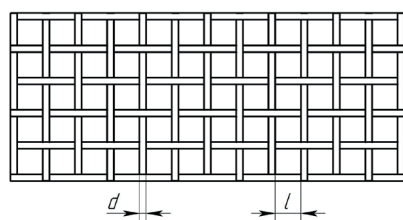
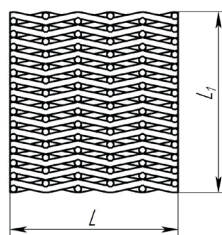
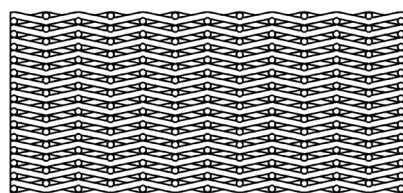


Рис. 3. Схематичное изображение экспериментального образца в трех проекциях (течение технологической среды осуществляется по площади фронтальной проекции)

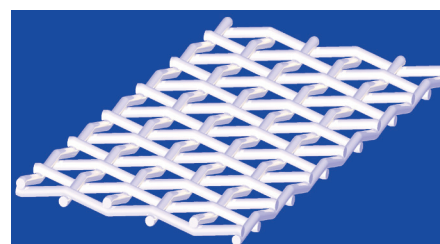


Рис. 4. 3D-модель слоя тканой сетки для изготовления экспериментального образца ФМТС

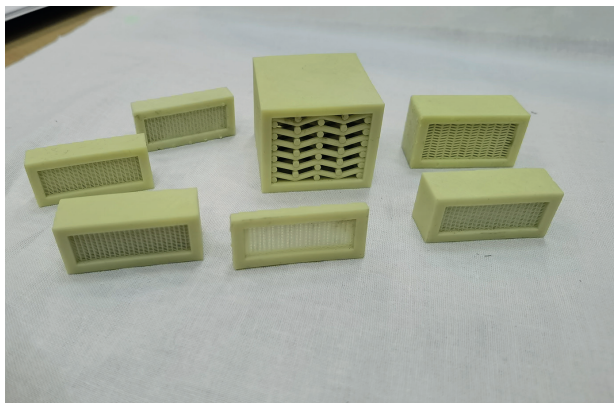


Рис. 5. Внешний вид образцов из ФМТС, изготовленных с частью корпуса

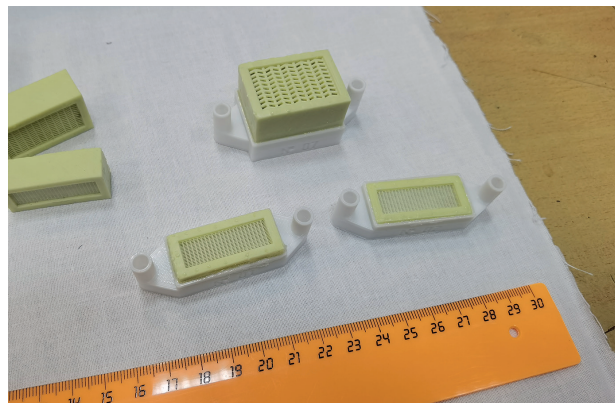


Рис. 6. Внешний вид образцов в сборе

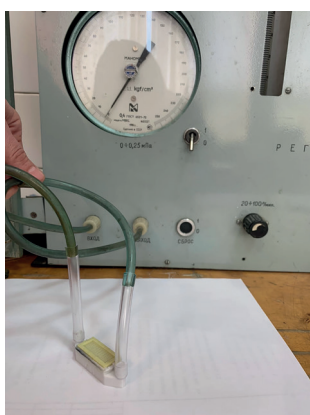


Рис. 7. Подключение образца к стенду



Рис. 8. Процесс измерения размеров пор

ные характеристики. Следует отметить, что стандартная методика установления величины пор применяется для определения пор с размерами от 1 до 250 мкм. Нижний предел ограничен ростом необходимого давления газа под образцом свыше 3–4 МПа, а верхний – невозможностью заполнения пор жидкостью, так как капиллярные силы, удерживающие жидкость в порах, становятся сравнимыми с силами тяжести [10]. Поэтому для части образцов размеры пор не приведены. На рис. 7 показано подключение одного из образцов к стенду для определения размеров

пор и коэффициента проницаемости. Процесс измерения размеров пор представлен на рис. 8.

Результаты исследований приведены в табл. 2 и на рис. 9.

Анализ полученных результатов показывает, что процесс фильтрации жидких сред через ФМТС подчиняется общим закономерностям, свойственным фильтрующим материалам. Начальная стадия фильтрации характеризуется ламинарным режимом течения среды через ФМ (имеет место прямолинейная зависимость пропускной способности от перепада давле-

Таблица 2. Свойства экспериментальных образцов

Номер образца	Коэффициент проницаемости, среднее значение, $\text{м}^2 \cdot \text{х}10^{-13}$	Максимальная величина пор, $d_{\text{макс}}$, мкм	Средняя величина пор, $d_{\text{ср}}$, мкм	Тонкость фильтрации, мкм
1	19300	229,4	219,2	250
2	19500	229,4	219,2	250
3	18400	229,4	219,2	250
4	18700	229,4	219,2	250
5	18700	224,2	224,2	250
6	40300	–	–	500
7	50600	–	–	900
8	99900	–	–	2000

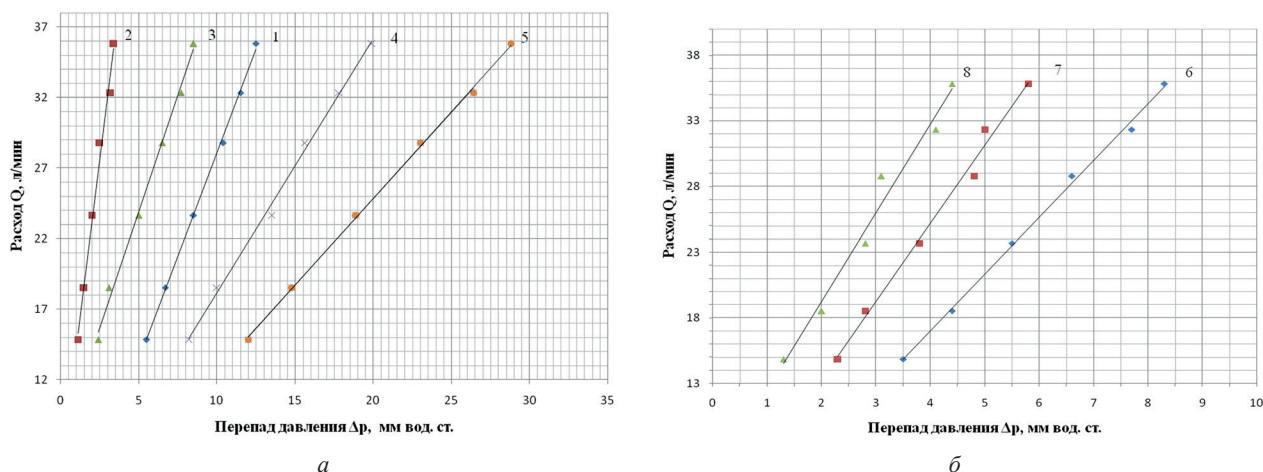


Рис. 9. Зависимость воздухопроницаемости образцов от перепада давления:
а – образцы № 1–5, б – образцы № 6–8

ния на образце), а тонкость фильтрации определяется характеристиками исходной тканой сетки (диаметр проволоки). Вместе с тем следует отметить, что тонкость фильтрации практически не зависит от размера ячейки в свету. 3D-моделирование и 3D-печать при изготовлении экспериментальных образцов, использованные в лаборатории фильтрующих материалов, впервые позволили существенно сократить трудоемкость процесса герметизации образцов перед измерениями, а также изготовления оснастки и самих образцов. Кроме того, полученный опыт помог сделать вывод о перспективности применения метода 3D-печати в дальнейшем для изготовления оснастки для исследования свойств фильтрующих материалов.

Закключение. Проведены исследования процесса фильтрации жидких сред через ФМТС.

Установлено, что начальная стадия процесса фильтрации характеризуется ламинарным режимом течения среды через ФМ (имеет место прямолинейная зависимость пропускной способности от перепада давления на образце), а тонкость фильтрации определяется характеристиками исходной тканой сетки (диаметра проволоки). При этом тонкость фильтрации не зависит от размера ячейки в свету.

Впервые для изготовления экспериментальных образцов ФМТС использовали 3D-печать, что позволило существенно сократить трудоемкость процесса герметизации образцов перед измерениями, а также изготовления оснастки и самих образцов. Кроме того, полученный опыт позволил сделать вывод о перспективности применения метода 3D-печати в дальнейшем для изготовления оснастки для исследования свойств фильтрующих материалов.

Литература

1. Порошковые фильтрующие материалы: управление структурой и свойствами и применение в сельском хозяйстве / А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2018. – 188 с.
2. Яблокова, М. А. Перспективные методы очистки дизельного топлива от воды и механических примесей / М. А. Яблокова, Е. А. Пономаренко // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 1–8.
3. Коваленко, В. П. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений / В. П. Коваленко, А. А. Ильинский. – М.: Химия. – 1982. – 272 с.
4. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник: в 2 кн. / В. Г. Айнштейн [и др.]; под ред. В. Г. Айнштейна. – М.: Высш. шк. – 2003. – 1784 с.
5. Пористые сетчатые материалы / Ю. И. Синельников [и др.]. – М.: Металлургия, 1983. – 64 с.
6. Алушкина, Т. В. Сетчатые дренажные фильтры в процессах очистки мазута от механических примесей / Т. В. Алушкина, М. В. Клыков // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2017. – № 4. – С. 26–41.
7. Способ фильтрования водонефтяных эмульсий, способ регенерации фильтрующего элемента и устройство для фильтрования водонефтяных эмульсий и регенерации фильтрующего элемента: патент № 2397799 Рос. Федерация, МКИЗ В01D29/48 / М. В. Клыков; заяв. 05.09.2007; дата публ.: 27.08.2010.
8. Кича, Г. П. Оптимизация поровой структуры тканых фильтровальных сеток судовых саморегенерирующихся очистителей топлива и масла / Г. П. Кича, А. В. Надежкин, С. П. Бойко // Транспортное дело России. – 2016. – № 3. – С. 133–139.

9. **Щелевой** фильтр: патент № 4811 Республика Беларусь, МПК 7 В 01D 29/44 / П. А. Витязь, Р. А. Кусин, И. В. Валькович, В. М. Капцевич, В. П. Круглей. – № 19980607; заяв. 29.06.98; дата публ.: 22.07.2002.

10. **Композиционный** фильтр: патент № 949 Республика Беларусь, U. В 01D 29/00 / В. М. Капцевич, А. В. Крутов, В. К. Корнеева, Г. Азаров, Р. А. Кусин, Г. А. Бокань, И. Л. Лыков, А. Р. Кусин. – № 20020395; дата публ.: 2003.09.30. Афіц бюл. № 3, 2003.

11. **Витязь, П. А.** Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин. – Минск: НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.

RESEARCHMENT OF LIQUID MEDIA FILTRATION OF THROUGH FILTER MATERIALS WITH ORTHOTROPIC STRUCTURE BASED ON WOVEN NETS

**A. Ph. Pyushchanka^{1,2}, I. M. Charniak², A. R. Kusin², V. M. Kaptssevich³,
R. A. Kusin³, N. V. Rutkovskaya³, D. V. Shamal⁴**

¹*O. V. Roman Powder Metallurgy Institute,*

220005, Platonov str. 41, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: nil23niipm@tut.by

²*Belarusian State Agrarian Technical University,*

220023, Independence avenue, 99, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: 19081877@mail.ru

³*ООО "3D systems", 220069, 3rd Shchors str. 9, room 57, office 707/3, Minsk,*

Republic of Belarus, e-mail: info@additive.by

Preliminary studies of the process of filtration of liquid media through filter materials with an orthotropic structure based on woven nets (FMWN) were carried out on model samples made using additive technologies. It was found that the initial stage of the filtration process is characterized by a laminar medium flow through the FM (there is a linear dependence of the throughput on the pressure drop on the sample), and the filtration fineness depends on the characteristics of the initial woven net (wire diameter). In this case, the filtration fineness does not depend on the size of the cell in the light. A conclusion is made about the prospects of using the 3D-printing method in the future for the manufacture of equipment for studying the properties of filter materials.