

ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ РОЗРАХУНКУ ПРОДУКТИВНОСТІ ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТУ З ПОЛІПРОПІЛЕНУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ГАЛУЗІ ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Вечерковська А. С., Поперешняк С. В.

1. Вступ

Фільтруванням (від латинського слова *filtrum*) називаються процеси розділення неоднорідних систем за допомогою пористих перегородок, які відокремлюють тільки фази. Розрізняють поняття «фільтрація» і «фільтрування», позначаючи першим з них процеси руху рідин і газів через пористі системи в природних умовах, а другим – процеси поділу багатофазних систем в промислових і лабораторних умовах [1].

Для проведення процесу фільтрації фільтр повинен задовольняти технічним вимогам, що пред'являються до нього споживачем. Для реалізації цих вимог, з метою підбору оптимального фільтруючого пристрою знадобиться відомості про режим проведення процесу фільтрації. Тому актуальним є розрахунок продуктивності фільтрувального елемента в залежності від галузі його застосування та фільтрувальних характеристик.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є процес фільтрації рідини через багат шаровий фільтруючий елемент.

У роботі будемо розглядати волокнистопористі фільтруючі елементи (ЕФВП) на основі волокноутворюючих поліпропіленів для фільтрів очищення природного газу, повітря, води та водних розчинів, гідравлічних і турбінних мастил, нафтопродуктів та інших органічних рідин. Основою для виготовлення ЕФВП є фільтруючий об'ємний нетканий матеріал (ФОНМ), який отримується шляхом аеродинамічного розпилення розплаву полімеру. Цей полімер має високу хімічну стійкість, низьку схильність до набухання в лугах, кислотах і нафтопродуктах. Ця властивість дозволяє використання даного матеріалу для виготовлення фільтруючих елементів широкого спектру застосування. А саме, в різних фільтрах і фільтрах-сепараторах, призначених для очищення природного і попутного газу від твердих частинок, краплинної вологи, масляного аерозолу та газового конденсату, а також у фільтрах, що застосовуються для фільтрації різних рідин. А така особливість структури ФОНМ, як аутогезійне з'єднання волокон в точках їх перетину, дозволяє ефективно використовувати їх в якості коалесцерів [2].

Розглянемо процес виготовлення елементів з пористого поліпропілену шляхом пневмоєкструзії. Метод полягає в формуванні розплавленого поліпропілену через філь'ери з подальшим розтягуванням незастиглого екструдату потоком гарячого повітря і нанесенням на обертовий гвинтовий

циліндричний стержень. Конструкція приймального пристрою дозволяє забезпечити безперервний процес формування безкаркасних елементів.

Отримана структура картриджів жорстка і стабільна, оскільки зафіксована термічними зшивками мікрОВОЛОКОН і трохи підпресована спеціальним валиком. При уявній простоті технології оператор повинен контролювати досить велику кількість параметрів процесу, враховуючи вхідний контроль якості вихідної сировини. Змінюючи ключові параметри, можна отримувати картриджі різного мікронного рейтингу від 0,3 до 100 мікрон, різної довжини і діаметру.

Галузь застосування елементів, які виготовлені з пористого поліпропілену, досить різноманітна (табл. 1). Це й облаштування водозабірних свердловин, фільтрація палива та паливно-мастильних матеріалів (ПММ), застосування фільтрів в промисловості, фільтрування газів та повітря, використання дренажних систем в сільському господарстві та будівництві тощо (рис 1).

Таблиця 1

Приклади застосування фільтруючих елементів в різних галузях

Галузь	Застосування
Підготовка води	Промислові фільтри Побутові фільтри Очищення промислових стоків
Харчова промисловість	Очищення питної води Фільтрація вина, пива, соків Очищення рослинного масла
Хімічна промисловість	Очищення води і хімічних розчинів Очищення гальванічних розчинів Очищення лаків, емульсій, фарб
Біотехнологія	Очищення культуральних рідин Мікрофільтрація Фільтрація в якості стерилізації
Машинобудівна промисловість	Очищення трансформаторних і турбінних мастил Очищення мастильно охолоджуючих рідин Очищення палива
Медична промисловість	Очищення водних розчинів Очищення неводних розчинів

Структура фільтроелементів формується на основі розрахунків, зроблених на підставі технічних вимог, які пред'являються до конкретного фільтру-сепаратора та складу рідини. Завданням розрахунків є визначення конструктивних параметрів ФОНМ (конструкції фільтроелементів і їх кількості в конкретному фільтрі), які, в свою чергу, повинні забезпечити основні експлуатаційні параметри: щільність, ефективність фільтрації, допустимий початковий перепад тиску.



Рис. 1. Галузі застосування елементів, які виготовлені з пористого поліпропілену методом пневмоєкструзії

Одним з найбільш проблемних місць є визначення необхідної кількості шарів в фільтрувальному елементі, їх щільність та товщина шару в залежності від галузі застосування. Виготовлений фільтр з обраними параметрами має задовольняти умові збереження максимальної продуктивності даного елемента. В сучасних умовах виробництва фільтруючих елементів підбір даних параметрів проводиться емпіричним шляхом, а продуктивність перевіряється експериментально. Цей процес вимагає додаткових матеріальних та часових ресурсів і не завжди гарантує отримання виробу найвищої якості.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є побудова методу для розрахунку продуктивності фільтруючого елемента в залежності від виду фільтруючого елемента і галузі його застосування, який може бути практично застосований на виробництві.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Проаналізувати основні галузі застосування елементів, які виготовляються зі «вспіненого» поліпропілену. Виділити призначення, технічні вимоги, режими навантаження та використання даних елементів.
2. Виділити основні фільтрувальні характеристики та визначити емпіричні коефіцієнти, що впливають на продуктивність фільтрувального елемента.
3. Отримати розрахунки для знаходження кількості фільтруючого матеріалу певної структури в залежності від процесу фільтрації.
4. Розробити прототип програмного засобу, який дозволяє проводити підбір структури та розмірів фільтруючого елемента в залежності від галузі застосування та середовищ.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Велику науково-дослідницьку роботу за властивостями поліпропілену (ПП) і використання на їх основі фільтрувальних матеріалів (ФМ) провели в державному університеті технології і дизайну м. Київ, Україна [3]. В даному розділі відзначимо їх найбільш важливі отримані результати і висновки щодо застосування ПП [4].

Фільтрувальні елементи, відрізняючись конструктивними особливостями, містять, як правило, три обов'язкових шарів: фільтруючий - для затримання механічних домішок, коалесцентний або коагулюючий шар і водовідвідних або водовідштовхувальний шар [5, 6].

За технічною суттю найбільш близьким до розглянутих вище фільтрувальних елементів є багатошаровий волокнистий фільтрувальний елемент, виконаний з волокон термопластичного полімеру, в тому числі і з поліпропілену, описаний в патенті RU 2182509 [7].

В патенті RU 2326716 пропонується створення недорогого багатошарового фільтрувального елемента фільтра-сепаратора, що забезпечує високу ступінь очищення газоподібних і рідких середовищ, таких як природний газ і рідке паливо, як від механічних домішок, так і від вільної вологи, що міститься в середовищі, що фільтрується у вигляді аерозолів [8].

Основною структурною одиницею розроблених ФМ є ультратонкі волокна з унікальною структурою поверхні: кожне волокно мікронних розмірів покрито по всієї поверхні найтоншими мікрофібрилами, що відходять від основного волокна [9]. В результаті отримуємо надзвичайно розвинену поверхню та будуть забезпечені високі сорбційні властивості і брудомісткість. Таких волокон немає в природі, і вони не можуть бути отримані за традиційними технологіями. До теперішнього часу розроблені і вже широко використовуються фільтри з поліпропіленових (ПП) мікрОВОЛОКОН з щільністю очистки 1; 0,45; 0,3 мкм. На рис. 2 показана збільшена структура ФОНМ з різним розміром пори, з рекомендованим розміщенням відносно потоку рідини, що очищається.

З огляду на хімічну інертність і стійкість до агресивних середовищ, в результаті токсикологічних випробувань тонковолокнисті ПП фільтри рекомендовані для очищення питної води в побутових умовах, ліків, які вводяться ін'єкційно в кров. На сьогоднішній день створені фільтри вже широко використовуються в медико-біологічній, харчовій, радіоелектронній промисловості. Це такі підприємства України, як: ВАТ «Днепрфарм» (м. Дніпро), ХГФ «Здоров'я» (м. Харків), фармацевтична фірма «Дарниця» (м. Київ), АТ «Фармак» (м. Київ) та Білорусії – «Белмедпрепарати» (м. Мінськ), а також багато інших підприємств.

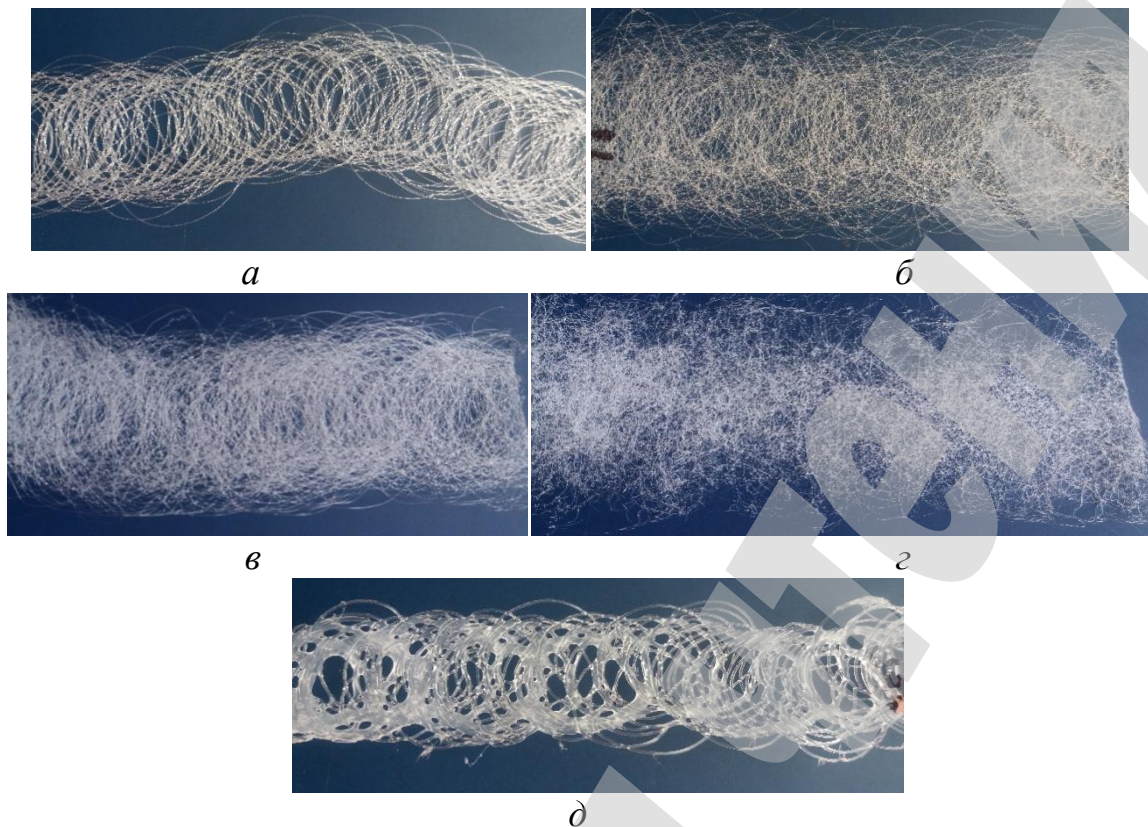


Рис. 2. Структура фільтруючого матеріалу з різним розміром пори розміщена відносно потоку рідини: *а* – брудоемнісний шар з розміром пори 50 мкм; *б* – брудоемнісний шар з розміром пори 35 мкм; *в* – предфільтруючий шар з розміром пори 20 мкм; *г* – фільтруючий шар з розміром пори 1–5 мкм; *д* – внутрішній (каркасний) шар з розміром пори 200–300 мкм

На сьогоднішній день виробництво ФОНМ зі «вспененого» поліпропілену освоєно в Україні та випускаються наступними підприємствами:

- ПП «Уніфільтр» (м. Бровари);
- ЗАТ «Укрфільтр» (м Чернігів);
- ПП «ТПК» (м. Київ);
- НВО «Екософт» (м. Ірпінь);
- ТОВ «Селтон» (м. Київ);
- ТОВ «ПНЕВМОТЕХНІКА» (м. Сімферополь);
- ТОВ «ТРИКОРД» (м. Дніпро) тощо.

Основними перевагами поліпропіленових фільтрувальних елементів (фільтроелементів) є:

- широкий діапазон фільтруючих елементів з ефективністю утримання часток від 0.3 мкм до 200 мкм;
- номенклатура фільтроелементів (фільтруючих картриджів) різної довжини для забезпечення необхідної продуктивності процесу фільтрування;
- багат шарова пориста структура забезпечує підвищену брудомісткість фільтроелемента в порівнянні з аналогами;
- відсутність міграції волокон з фільтруючого шару картриджа;

- висока хімічна стійкість до широкого спектру хімічних реагентів;
- відсутність сполучних речовин, мастил і поверхнево-активних речовин при виробництві.

З ФОНМ виготовляють два основні класи фільтроелементів, що розрізняються за принципом дії: для очищення від механічних домішок і фільтроелементи коалесцери.

Базовим полімером для ЕФВП є поліпропілен, так як він має високу механічну міцність (руйнівне напруження при розтягуванні до 35 МПа). Це дозволяє використовувати його в фільтроелементі (ФЕ), не тільки як фільтруючий матеріал, але й як частину каркасної конструкції ФЕ. Тобто замінити в деяких випадках внутрішній перфорований каркас, наприклад, металевий, каркасом з грубих волокон поліпропілену термічно з'єднаних в точках перетину один з одним.

Важливо відзначити, що коалесцери відрізняється від звичайного фільтра тим, що вони виконують як функцію фільтрації тонких твердих частинок, так і коалесценції (злиття дрібних крапель) і відділення рідини з газового потоку. Такі фільтри мають, як правило багат шарову структуру (5 і більше шарів) з використанням ефекту зміни швидкості проходження газів в цих шарах [8]. Тому критерії визначення оптимальних розмірів для коалесцерів дуже важливі для забезпечення високої продуктивності і ефективності. Зменшений розмір коалесцерів призведе до вторинного уносу рідини і буде чутливий до будь-яких змін в процесі. Продуктивність такого коалесцеру може швидко знижуватися при значному збільшенні вмісту рідини в обсязі фільтрувального матеріалу [2, 4].

Фільтрувальні елементи застосовуються для очищення рідин та газів, що мають певну кількість механічних домішок різних за розміром і фізичними властивостями. Вони мають, як правило, три або більше шарів різної структури за діаметром волокон і щільністю матеріалів.

Наприклад, патронний фільтруючий елемент, який працює з подачею рідини зовні всередину, має міцний та грубий внутрішній каркасний шар. На нього накладається тонковолокнистий щільний фільтруючий шар а далі, поверхневий шар меншої щільності, який виконує функції накопичувача бруду [8, 10, 11] (рис. 3).

Єдиної думки щодо кількості шарів в фільтруючому елементі, їх процентного співвідношення і щільності, які потребує даний конкретний процес фільтрування не існує [10]. На практиці їх можна отримати, наприклад, шляхом варіювання тиску повітря на розплавлений поліпропілен. Очевидно, вибір найбільш прийняттого технічного рішення має базуватися на даних, знятих з реально діючого виробничого комплексу. При експериментальній зміні вхідних параметрів, вимірів отриманих шарів і їх щільності порівнюються результати продуктивності отриманого елемента в залежності від області застосування. Емпіричним методом визначають максимальну пропускну здатність фільтруючого елемента з урахуванням його допустимої міцності.

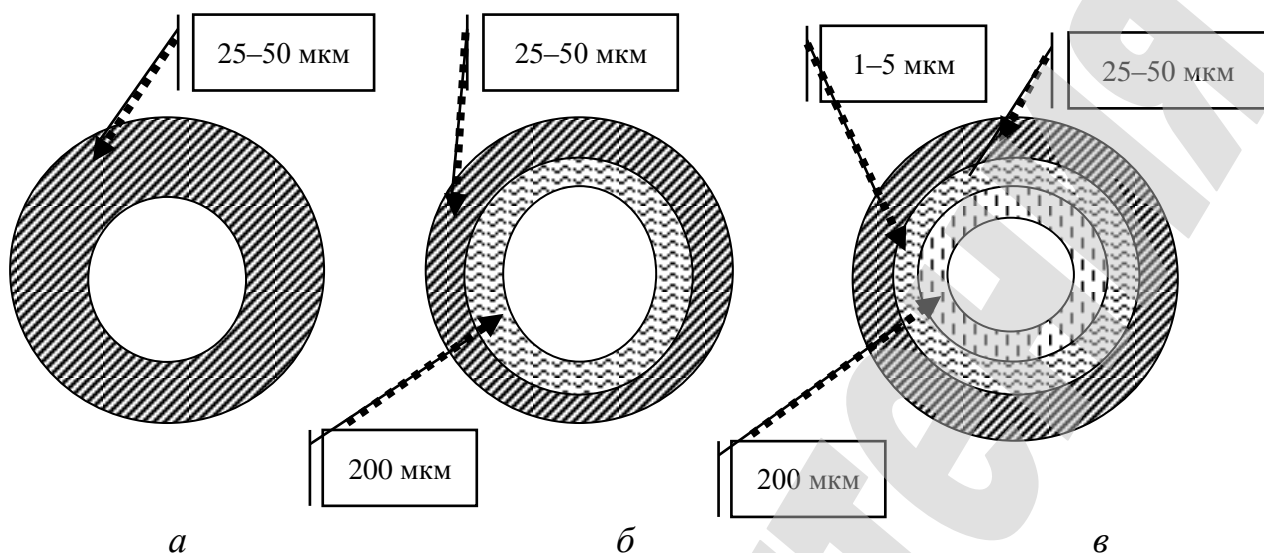


Рис. 3. Приклад розташування шарів в патронному фільтруючому елементі:
a – одношаровий фільтруючий елемент; *б* – двошаровий фільтруючий елемент;
в – тришаровий фільтруючий елемент

В роботах дослідників найчастіше розглядають нові технології в сфері фільтрувальних матеріалів, структури фільтрів, сировинний склад [12–20]. Також увага приділяється самому процесу фільтрації рідини через фільтруючий елемент [10–13].

А саме, в роботі [14] отримана кількісна інформація про ефект армування поліпропілену з різними пропорціями наночарів. В роботі [15] досліджено вплив на конкретні елементи, посилені з поліпропіленовими волокнами.

Було проведено дисперсний аналіз для досягнення високої міцності поліпропіленового елементу з урахуванням основних параметрів процесу виготовлення, а саме: температури, температури стовбура та швидкості гвинта в роботі [16]. Приділено увагу будові обладнання для виготовлення елементів з поліпропілену в роботі [17]. В цій роботі зазначено, що гвинтовий профіль екструдера з подвійним гвинтом може бути спроектований таким чином, щоб містити елементи, які викликають різні рівні деградації в розплаві полімеру. В роботі [18] розглядаються унікальні властивості поліпропілену та приділено увагу структурі елементів зі «вспіненого» поліпропілену. Було зазначено, що початковий модуль композитів зростає з збільшенням фракції волокна, тоді як розподіл орієнтації короткого волокна мало впливає на композити; криві напружено-деформованого характеру практично не змінюються. В роботі [19] було встановлено, що поведінка усадки композитів з поліпропілену на основі поліпропіленової термопластичної еластомери аналогічна характеристиці звичайного поліпропілену.

В роботі [20], вивчаючи структуру елементів зі «вспіненого» поліпропілену, було виявлено, що в поліпропіленових сумішах може бути отримана або спільна кристалізація, або фазова відокремленість залежно від умов кристалізації.

Приділяючи увагу міцності елементу зі «вспіненого» поліпропілену, в роботі [21] досліджувалось високоміцне поліпропіленове волокно, яке було

виготовлено з поліпропіленового глинистого композиту методом спалювання розплаву. Результати показали, що композит поліпропілену мав кращу роздільну здатність і забезпечував волокна з поліпшеними механічними властивостями при вміщенні глини 10 %.

В роботі [22] було розглянуто фотодеградацію поліпропілену та поліпропілену, що містять пірен в якості добавки.

Таким чином, результати аналізу літератури та практичного досвіду виробників України дозволяють зробити висновок, що питання виготовлення елементів із «вспіненого» поліпропілену досить перспективне та поширене, завдяки унікальним властивостям поліпропілену. Процес виробництва таких елементів запроваджено у багатьох країнах світу. Але те що стосується автоматизації виробництв елементів з пористого поліпропілену методом пневмоекструзії, то до сьогоднішнього дня немає схожих досліджень в цьому напрямку.

5. Методи дослідження

Відома математична модель фільтрації рідини в пористому середовищі базується на рівнянні нерозривності і законі Дарсі для полого пористого циліндра [11, 23].

Відзначимо, що в загальному випадку порядок системи алгебраїчних рівнянь, до якого зводиться рішення рівняння Дарсі [23] може дорівнювати кільком мільйонам, таким чином, дану систему доводиться вирішувати ітераційними методами. Наприклад, використовуються метод простих ітерацій, метод Зейделя, метод сполучених градієнтів, стабілізований метод біспряжених градієнтів тощо. Для прискорення вирішення отриманої системи рівнянь застосовується паралельне обчислення на багатоядерних CPU, а також на GPU (зокрема, використовується технологія CUDA).

Після розв'язання системи алгебраїчних рівнянь, до якого зводиться розв'язок рівняння Дарсі [23], наближене значення вектора швидкості фільтрації знаходиться шляхом чисельного диференціювання обчисленого гідравлічного напору.

Очевидно, що даний метод є суто теоретичним і відповідно, майже, неможливим для його застосуванні на практиці.

Виділимо основні параметри, які визначають вибір відповідного фільтра і його експлуатаційні характеристики.

1. Обсяг фільтрованої рідини в одиницю часу (продуктивність фільтра) (л/хв).
2. Кількість механічних домішок у фільтрованої рідини (мг/л).
3. Час безперервної роботи фільтра (год).
4. Рейтинг фільтрації (мкм).
5. Гідравлічний опір фільтра.
6. В'язкість і температура рідини.

Це основні показники, на основі яких можна розрахувати фільтр. Розширені можливості пошуку, такі як хімічний склад рідини і домішок, впливають тільки на підбір матеріалу корпусу фільтра.

Параметр, який є головним при розрахунку геометричних розмірів фільтра (що обумовлює його розмір і вартість), називається брудомісткістю [24].

Брудомісткість фільтра M – маса забруднюючих речовин, яку здатний затримати фільтр до зупинки.

Необхідна брудомісткість фільтру визначається кількістю рідини, що протікає W (л/год), часом безперервної роботи фільтра t_0 (годину) і концентрацією домішок у вихідній рідині (кг/л):

$$M = W \cdot C \cdot t_0.$$

Обсяг осаду (в м^3), що утворюється дорівнює:

$$V_{oc} = \frac{M}{\rho T / (1 - \delta)},$$

де ρT – щільність зневодненого осаду ($\text{кг}/\text{м}^3$); δ – вологість осаду (обсяг рідини в осаді, віднесений до обсягу осаду).

6. Результати дослідження

6.1. Методика розрахунку

Методика розрахунку складається з таких кроків:

1. Визначити вихідні данні, такі як: тип речовини, яка буде фільтруватися, кількість домішок в речовині, продуктивність роботи фільтра, час його роботи.
2. Розрахувати брудомісткість фільтруючого елементу та сумарний об'єм осаду.
3. Розрахувати кількість фільтруючого матеріалу певної структури в залежності від процесу фільтрації.

6.2. Приклади розрахунку

6.2.1. Технічні умови

6.2.1.1. Продуктивність ЕВФП

Існують кілька визначень продуктивності. Мінімальна, номінальна, максимальна продуктивність визначається розрахунковим шляхом, наприклад, для розрахунку поверхневих стічних вод, або технологічного процесу промислового підприємства. Розрахунок зазвичай ведуть за номінальною та середньою продуктивністю [25]. Це обумовлено тим, що фільтр, в ідеалі, повинен мати стабільну характеристику. Тоді оператору простіше вести технологічний процес, не треба робити змін в технологічній схемі. Номінальна продуктивність визначає стабільність в ефективності очищення води, так як робить її більш прогнозованою, при стабільних характеристиках якості води, що очищається. Перехід від номінальної до мінімальної продуктивності не викликає істотних змін в процесі фільтрації, пов'язаних з ефективністю і гідравлічним опором. Зворотній процес зміни продуктивності від мінімальної – номінальної – до максимальної може викликати різке збільшення гідравлічного

опору на ЕВФП і зміну ефективності. Тому ці зміни треба проводити не східчасто, дискретно, а максимально плавно, рівномірно і під наглядом оператора. Оператор зобов'язаний звертати при цьому увагу на:

- дзеркальну поверхню фільтра, щоб не спостерігалось «простінкових ефект»;

- тиск фільтрування на кожному шарі ЕВФП;

- якість води на вході і виході установки [2, 4].

Форс-мажорні ситуації можуть викликати аварійну продуктивність ЕВФП. Ці ситуації реальні в виробничому процесі і до них треба бути готовими. Прикладом таких ситуацій можуть бути помилки операторів під час регулювання продуктивності рідин, які очищуються на ЕВФП, зазвичай, це відбувається на насосному обладнанні або засувках – розрив фільтруючого матеріалу тощо. Такі ситуації може бачити оператор, але буде краще, якщо їх появу буде виявляти датчик тиску або датчик витрати рівня води. Аварійний сигнал від цих датчиків повинен мати вихід на світлову або звукову сигналізацію, з можливістю створення автоматичної схеми з відключення необхідного обладнання з експлуатації.

Продуктивність Q ЕВФП розраховується за формулою:

$$Q = S \cdot U,$$

де S – площа фільтра; U – швидкість фільтрації.

З досвіду дослідження фільтруючого модуля приймаємо максимальну швидкість фільтрації 100 м/год, номінальну – 50 м/год, мінімальну – 25 м/год.

6.2.1.2. Якісний склад стічних вод

Для ефективної роботи ЕВФП треба знати гранулометричний склад рідин, що очищується, наприклад, стічних вод. Це одна з головних умов ефективної роботи ЕВФП.

Під ефективною роботою ЕВФП мають на увазі також її економічну складову: експлуатаційні витрати, пов'язані з витратою електроенергії, трудових витрат, витратою фільтруючого матеріалу тощо.

Тому під гранулометричним складом стічних вод, що очищуються, маємо на увазі тільки такі стічні води, які пройшли седиментаційну обробку протягом 15, 20, 25, 30 хв. Це в ідеальному варіанті для повного гранулометричного аналізу. В скороченому аналізі можна обійтися і 15-хвилинною седиментацією стічних вод, що очищуються. Практична сутність цієї характеристики полягає в тому, що на фільтр можна подавати стоки без попереднього очищення. Під таким очищенням розуміється тільки седиментація в динамічному відстійнику.

Гранулометричний аналіз треба проводити при різній продуктивності: мінімальній, номінальній та максимальній, які побічно характеризують різний склад стічних вод, які очищаються. Гранулометричний склад стічних вод можна визначити по кондуктометричному методу дисперсійного аналізу або

методом малих кутів при фотометричних вимірах, що дозволяють знаходити розподіл часток по масі або розміру [4].

Через шари фільтруючого матеріалу з розмірами пори 60, 25, 10, 5, 1 мкм фільтрувалася брудомістка дренажна вода в кількості 20 м³. Після цієї фільтрації фільтруючий матеріал висушується і висічкою діаметром 8 мм робляться зразки фільтрувальної тканини.

Зразки ще раз просушуються, зважуються, після чого вони оброблюються чистим гексаном, щоб видалити брудопродукти. Далі зразки остаточно просушуються і зважуються.

Розподіл фільтрату за розміром частинок складається наступним чином:

1-5 мкм – 28,84 %;

5-10 мкм – 25 %;

10-25 мкм – 17,25 %;

25-60 мкм – 11,2 %;

Більше 60 мкм – 17,71 %.

Сутність гранулометричного аналізу полягає у визначенні та розподілі технологічного навантаження на ФОНМ. Наприклад, якщо в процесі фільтрування буде шар лише з розміром пор 1 мкм, тона ньому будуть затримуватися всі частини більші за 1 мкм. При послідовному використанні двох шарів з порами 20 і 1 мкм технологічне навантаження розподіляється іншим чином. Спершу затримуються частини розміром 20 мкм і більші, а далі будуть затримані фракції з розміром частинок від 20 до 1 мкм. Таким чином, завдання полягає в тому, щоб технологічне навантаження рівномірно розподілити між шарами ФОНМ з різними розмірами пор, тобто:

$$N = \int_{0,3}^{80} f(\delta),$$

де δ – розмір пори ФОНМ.

Складові інтеграла повинні бути рівні. Треба мати на увазі, що це навантаження в процесі експлуатації ФОНМ буде змінюватися в бік збільшення фільтруючих шарів з великим розміром пор. Це пов'язано з так званим «намивним ефектом», коли пори ФОНМ будуть частково перекриватися затриманими домішками і тим самим зменшать їх розміри. В результаті будуть затримуватися більш дрібні частинки.

Зовні це буде проявлятися в зміні тиску під час фільтрації. Якщо в початковий момент перепад тиску перед кожним шаром буде однаковим, то в подальшому на нижніх шарах цей перепад буде більше. Це треба враховувати при визначенні фільтроцикла за умови обмеження по тиску на ФОНМ.

6.2.2. Розрахунок і вибір конструктивних елементів ЕВФП

6.2.2.1. Визначення кількості шарів ФОНМ

З технологічної точки зору, чим більше шарів ФОНМ з різним розміром пори, тим ефективніше повинна працювати фільтруюча установка, де кожен

шар, в середньому, має відносну ефективність в діапазоні від 30 до 50 %. Ця відносна ефективність змінюється не по швидкості фільтрації, а від гранулометричного складу рідини, що очищується в момент відбору проб. За умовою виробника ФОНМ рейтинг пор може бути від 60 до 0,3 мкм. Приймається, що розмір пори від шару до шару повинен відрізнятись в 4–8 разів (коефіцієнт $N\delta$). Це пов'язано з умовами ефективної регенерації ФОНМ та максимального часу фільтроцикла. Якщо розбити рейтинг пор ФМ в діапазоні 60–0,3 мкм з $N\delta=5$, то вийде наступний ряд: 60; 12; 2; 0,3 мкм. Цей ряд треба перевірити на навантаження по гранулометричному складу рідин, що очищаються. Якщо навантаження буде значно відрізнятись, то необхідно зробити корекцію за коефіцієнтом $N\delta$. Вважаємо, що максимальна кількість шарів ФМ може бути, по конструктивним міркуванням, не більше 5, мінімально – 2. Самий щільний шар, з порами 0,3 мкм може бути неміцним через його текстуру. Тому пропонуємо його посилити механічно міцним верхнім шаром ФОНМ з максимальним розміром пор 60 мкм і товщиною 5 мм. Між кожним шаром необхідно встановлювати проміжні рамки з мінімальною товщиною в 10 мм для гідравлічного розвантаження шарів по шару осаду і посилення механічної міцності нижнього фільтруючого шару.

6.2.2.2. Розрахунок параметрів елементів конструкції фільтра – системи ЕВФП

Виходячи з мінімальних граничних умов фільтра – системи ЕВФП, він може складатися з двох фільтруючих модулів, розташованих один над іншим. Це пояснюється умовами надійності, взаємозамінності, резервуванням щодо максимальної продуктивності. Один горизонтальний рівень ЕВФП утворює фільтруючу секцію (ФС). Оскільки горизонтальних рівнів ЕВФП може бути від двох і більше, то відповідно така ж кількість може бути фільтруючих секцій. Фільтруюча секція може складатися з одного, двох, трьох і більше фільтруючих уніфікованих модулів (ФУМ), залежно від максимальних розмірів фільтропласта. В досліджуваному випадку використані фільтропласти з максимальними розмірами 650x550 мм, що «в чисту» складає розмір фільтруючої площі уніфікованого модуля близько 0,25 м².

З умов зручності обслуговування, якщо дозволяють виробничі площі, пропонуються фільтри з двох фільтруючих секцій. Кількість ФУМ в секції може бути 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 тощо.

Номінальна продуктивність ФУМ розрахована на швидкість фільтрування 50 м/год:

$$Q_{mn} = 0,25 \cdot 50 = 12,5 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Визначимо кількість ФУМ в фільтрі-системі ЕВФП за формулою:

$$N_m = \frac{Q}{Q_{mn}}.$$

Результат округляємо до найближчого максимального числа з наступного числового ряду: 2, 4, 6, 8 тощо. Наприклад, якщо результат буде 3,4, то вибираємо число N_m рівним 4, якщо 4,2 – то $N_m=6$ тощо.

За обраним значенням N_m можна уточнити номінальну (а також максимальну, мінімальну) продуктивність ЕВФП.

6.2.2.3. Рекомендації щодо визначення фільтроциклу ЕВФП

Фільтроцикл визначається часом від промивання до промивання ФОНМ. Основною умовою фільтроциклу буде максимальний перепад тиску (від 0,1 до 0,4 МПа), на яке рекомендуємо розрахувати ЕВФП.

На фільтроцикл впливають такі показники:

1. Фільтрувальне завантаження ФУМ.
2. Якість рідини, яку очищуємо.
3. Швидкість фільтрації.
4. Якість проведених регенерацій ФОНМ.

Теоретично розрахувати фільтроцикл дуже складно, тому рекомендуємо цю проблему попередньо досліджувати за допомогою експериментального ЕВФП.

Приклад. Розглянемо приклад циліндричного фільтруючого елемента зі способом фільтрації із зовні всередину:

I. Вихідні дані:

1. Тип рідини – вода.
2. Продуктивність фільтру: $W=10000$ л/год.
3. Кількість механічних домішок в рідині, що фільтрується: $C=100$ мг/л.
4. Час неперервної роботи фільтра: 1 робоча доба, $t_0=22$ год.
5. Додаткові дані: щільність матеріалу сухого осаду дорівнює 1,5 кг/л, вологість осаду – 75 %.

II. Розрахунок брудомісткості фільтра і загального обсягу осаду (табл. 2).

Таблиця 2

Розрахунок брудомісткості фільтра і загального обсягу осаду

№	Фізична величина	Розрахунок	Значення
1	Необхідна брудомісткість фільтра	$0,1(\text{г/л}) \cdot 10000(\text{л/год}) \cdot 22(\text{год})$	22 кг
2	Сумарний обсяг осаду (вважаємо вологість осаду рівним 75 % і щільність твердих частинок рівній 1,5 кг/л, коефіцієнт запасу – 1,2)	$\frac{22(\text{кг}) \cdot 1,2}{1,5(\text{кг / л}) / (1 - 0,75)}$	71 л

III. Розрахунок параметрів фільтрів механічного очищення.

Сумарна площа фільтруючої поверхні дорівнює відношенню сумарного обсягу осаду до товщини шару осаду, який вибираємо рівним 5 мм. Дана товщина шару осаду традиційно вибирається для фільтрів низького тиску (до 12 атм.)

(табл. 3), виходячи з умови прийнятного перепаду тиску на фільтроелементі – не більше 2–3 атм:

$$S = \frac{0,071(\text{м}^3)}{0,005(\text{м})} = 14,2 \text{ м}^2.$$

Внутрішній діаметр фільтроелементу вибираємо рівний діаметру вхідного і вихідного патрубків фільтра. Для витрати 10000 л/год оптимальний діаметр патрубків фільтра становить 60 мм.

Зовнішній діаметр фільтроелементу вибираємо рівним 120 мм.

Відповідно, внутрішній діаметр корпусу фільтра вибираємо рівним 150 мм.

Виходячи з розрахованої площі фільтрувальної поверхні, визначаємо сумарну висоту фільтроелементів:

$$\frac{14,2(\text{м}^2)}{\pi \cdot 0,12(\text{м})} = 38 \text{ м}$$

Приймаємо висоту одного фільтроелемента 0,9 м.

Отже, для очищення води, згідно з наведеними технічним умовам потрібно 42 фільтруючих елементів.

Таблиця 3

Визначення гідравлічних характеристик

№ п/п	Продуктивність W_t , л/хв	Тиск на вході фільтра $P_{вх}$, кгс/см ²	Тиск на виході з фільтра $P_{вих}$, кгс/см ²	Перепад тиску на фільтрі P , кгс/см ²
1	500	0,35	0,2	0,15
2	670	0,45	0,25	0,2
3	900	0,7	0,4	0,3
4	1000	0,8	0,45	0,35
5	1100	0,95	0,55	0,4
6	1000	0,8	0,45	0,35
7	900	0,7	0,4	0,3

6.2.2.4. Засіб для проектування фільтруючого елементу

Для розрахунку необхідних параметрів (розмір фільтру, діаметр, кількість шарів, щільність шарів) розроблено прототип програмного забезпечення, зовнішній вигляд середовища розробки прототипу представлено на рис. 4.

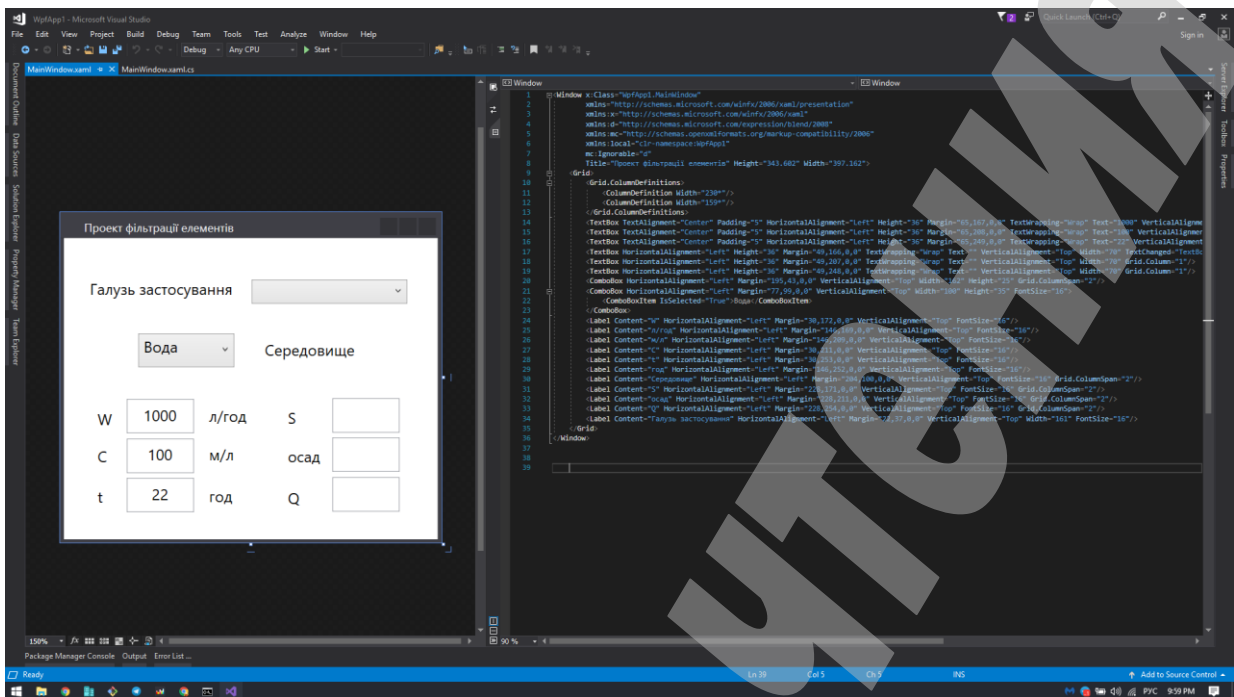


Рис. 4. Зовнішній вигляд середовища розробки прототипу

Для реалізації застосунку було використано шаблон проектування MVC (Model – View – Controller, Модель- Вигляд -Контролер). Основна ідея шаблону – це розподіл відповідальності, де кожна частина архітектури MVC є чітко визначеною та автономною. Цей шаблон розділяє систему на три частини: модель даних, представлення даних та контролер, який керує обміном даними. Кожна частина виконує лише свої визначені функції.

Застосувавши цей шаблон до проектування даного застосунку можна виділити наступні основні компоненти:

- Контролер;
- Сервіс;
- Репозиторій;
- Конфігурація;
- Модель даних;
- Інтерфейс користувача.

Застосування об'єктно-орієнтованого підходу до програмування компонентів даного програмного засобу підвищить можливості повторного використання, тестування та гнучкість розроблюваного засобу.

В роботі програмна розробка побудована на основі тривірневої архітектури, що представлена на рис. 5.

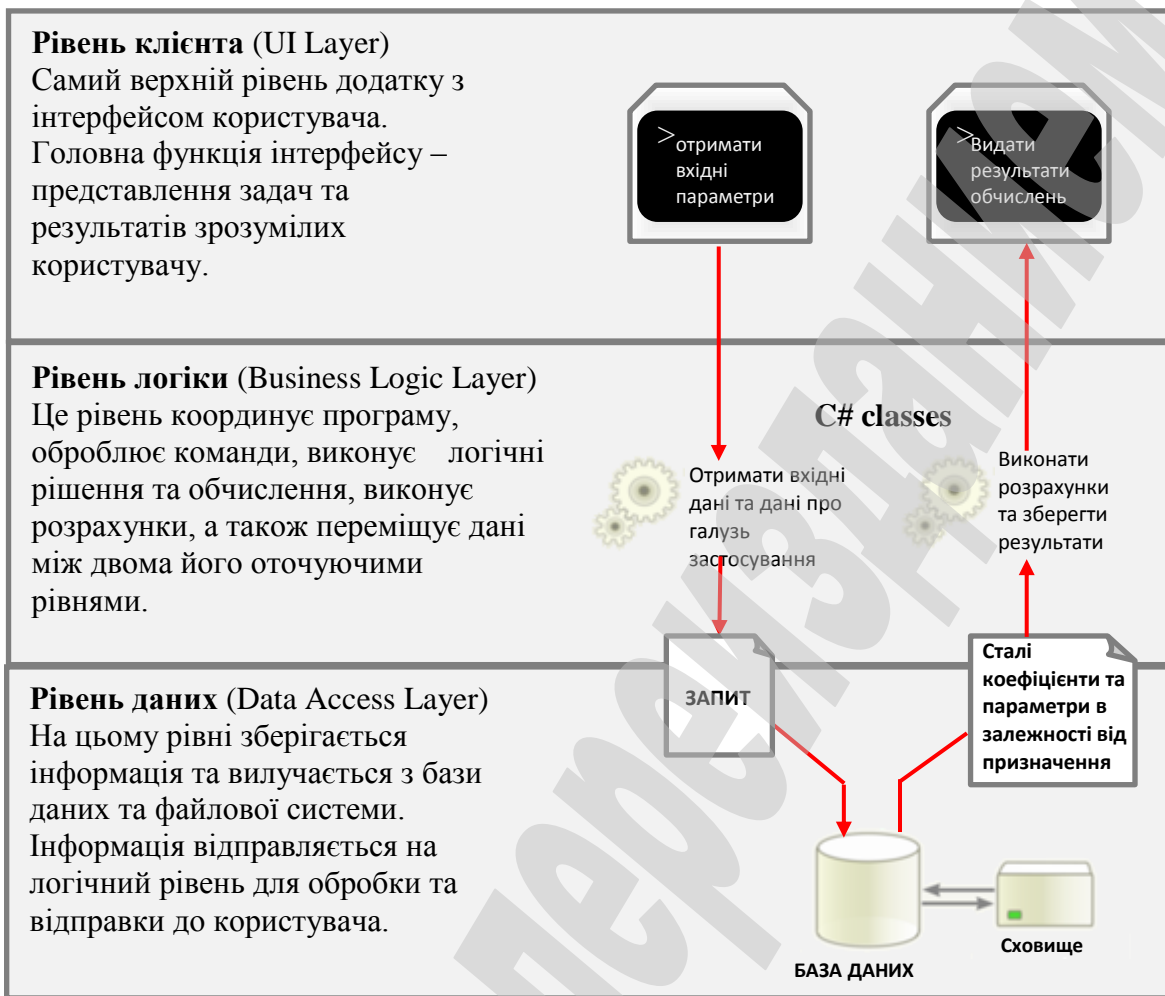


Рис. 5. Трирівнева архітектура створюваного програмного засобу

Для розробки даного програмного засобу обраний об'єктно-орієнтований підхід до програмування. Цей вибір обґрунтований наступними чинниками:

- можливість повторного використання коду;
- відсутність необхідності розробки класів з нуля, за рахунок спадкування;
- підвищення безпеки коду за рахунок інкапсуляції;
- гнучкість при модифікації і розширенні системи;
- загальна орієнтованість об'єктно-орієнтованої технології на розробку інформаційних систем, як класу програмного забезпечення і т. п.

Проектування особливостей фізичного представлення системи зображено на рис. 6.

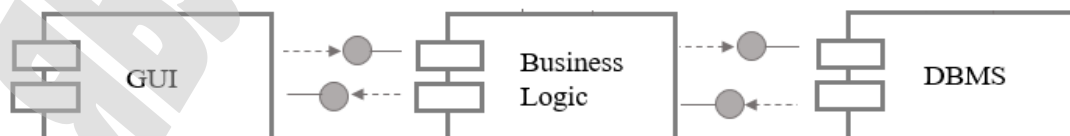


Рис. 6. Трирівневе групування компонентів створюваного засобу

Окрім вибору та розподілу рівнів і їх компонентів, при проектуванні архітектури важливо визначити інтерфейс, який би забезпечував слабе зв'язування між шарами. Тобто, шар не повинен розкривати внутрішні деталі, від

яких може залежати інший. Для його реалізації був обраний підхід заснований на взаємодії з компонентами інших шарів безпосередньо через виклик їх методів або доступ до їх властивостей. При цьому, для взаємодії між шарами використовується загальний клас, що інкапсулює всі деталі взаємодії і забезпечує загальну модель обробки виключень і помилок в шарі бізнес-логіки.

На основі проведеного аналізу предметної області була побудована концептуальна модель з використанням мови ER-моделювання.

Проектування баз даних включає в себе логічне проектування, яке являється розробкою логічної структури системи баз даних без прив'язки до конкретної СУБД, структур збереження, методам доступу і т.д.

Демонстрацію роботи можна почати із основної функції – розрахунок ключових параметрів, в залежності від галузі застосування та середовища, в якому проходить фільтрація.

Даний прототип, дозволяє проводити модельний розрахунок фільтруючого елемента (рис. 7), а саме проводити підбір структури і розмірів фільтруючого елемента в залежності від галузі застосування та середовищ.

Parameter	Value	Unit
W	1000	л/год
C	100	м/л
t	22	год
S		
осад		
Q		

Рис. 7. Інтерфейс прототипу, що дозволяє проводити модельний розрахунок фільтруючого елемента

Результати розрахунку порівнювали з результатами натурних випробувань фільтруючих елементів в реальних умовах. Порівняння показує досить високий збіг результатів, що дозволяє використовувати прототип, як основу для розробки програмного забезпечення для проектування фільтроелемента, який в подальшому плануються впровадити на виробництві фільтруючих елементів.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Серед сильних сторін даного дослідження є можливість практичного використання його результатів при проектуванні фільтруючих елементів в процесі виробництва з прив'язкою до конкретних умов застосування. Прив'язка результатів дослідження до проектування

фільтруючих елементів дозволить полегшити вибір і послідовність режимів роботи обладнання, яке виробляє фільтруючі матеріали, в процесі їх виготовлення, а також скоротити час на сам процес проектування фільтру.

Weaknesses. Стримуючою стороною дослідження є необхідність залучення додаткових коштів на послуги висококваліфікованих спеціалістів, комп'ютерної техніки для розв'язання поставлених завдань, а також отримання швидкого та гарантованого результату.

Opportunities. Запропонована методика дасть змогу автоматизувати виробництво фільтрувальних елементів з метою оптимізації кількості шарів за їх структурою та об'ємом для досягнення певних визначених властивостей фільтру. Основними аспектами фільтрувальних елементів є брудноємність, перепади тиску, особливості фільтрації, продуктивність та особливості суспензії, яка підлягає фільтрації.

Threats. Необхідність даної методики та програмного засобу обумовлені тим, що на виробництві традиційно використовуються методики і програми, засновані на практично сформованому підході, які, як правило, містять сім фільтрувальних шарів з усередненим значенням товщини фільтру [8]. На даний час на підприємствах України не використовується автоматичне виробництво багат шарових фільтрувальних елементів. Впровадження даної методики на підприємствах вимагає додаткових витрат. Це переобладнання та розширення матеріальної бази виробництва, лабораторні дослідження експериментальних зразків фільтруючих елементів з заданою щільністю та товщиною шару тощо. Але впровадження даної методики в цілому позитивно відобразиться на роботі підприємства.

8. Висновки

1. Проаналізовано основні галузі застосування елементів, які виготовляються зі «вспіненого» поліпропілену. Внаслідок аналізу було виявлено, що основні функції, які виконують дані елементи, це, в основному, дренажні або фільтруючі. Було розглянуто однокомпонентну модель течії суспензії через пористе середовище та проведено гранулометричний аналіз рідини, що очищується. Таким чином, отримано відсотковий стан фільтрату в залежності від розміру частинок.

2. Виділено основні фільтрувальні характеристики та визначено основні параметри, що впливають на продуктивність фільтрувального елементу. Виявлено, що в залежності від галузі застосування та призначення фільтруючого елементу він може мати різну кількість шарів та різну структуру цих шарів. Наприклад, для дренажних систем це, як правило, один шар з щільністю 100–200 мкм, а для фільтруючих елементів це, як мінімум, три шари: каркасний, фільтруючих та брудомісткість. Причому, кількість шарів може бути як дискретною, так і неперервно змінюватися в напрямку проходження рідини зі зміною розмірів пори в структурі фільтруючого елементу.

3. Отримано розрахунки основних параметрів, які впливають на розмір і структуру фільтруючого елементу: це брудомісткість та обсяг осаду. Враховано умову збереження максимальної продуктивності фільтруючого елементу, яка

залежить від площі та швидкості фільтрації. Експериментально обґрунтовано побудову багат шарового фільтруючого елемента шляхом зміни тиску повітря на обладнанні для формування ФОНМ. Отримано методику для організації розрахунків кількості фільтруючого матеріалу певної структури в залежності від:

- процесу фільтрації, яка включає в себе визначення вхідних даних рідини чи газу, які будуть фільтруватися;
- формули для розрахунку брудомісткості фільтру та продуктивності фільтрації. Дана методика носить практичний характер та її можна застосувати на виробництві.

4. Розроблено прототип програмного засобу, який дозволяє проводити підбір структури та розмірів фільтруючого елемента в залежності від галузі застосування та середовищ. В даний час цей прототип знаходиться на етапі тестування на підприємстві, що займається виробництвом фільтрувальних елементів широкого спектру застосування. Після етапу тестування даний програмний засіб буде використано, як один з модулів системи автоматизації процесу виробництва поліпропіленових механічних картриджів з подальшим впровадженням на підприємствах, які займаються виготовленням фільтруючих елементів.

Література

1. Parmakli I. I., Poslavskiy S. A. Rasprostranenie volny zagryazneniya pri fil'tratsii suspensii v poristoy srede: proceedings // Sovremennye problemy matematiki i ee prilozheniya v estestvennykh naukakh i informatsionnykh tekhnologiyakh. Kharkiv, 2012. P. 84.
2. Demkov A. I. Poisk i kharakteristika fil'truyushhikh materialov dlya ochistki vod. Kharkiv: Fakt, 2004. 306 p.
3. Bakteritsidnye tonkovoloknistye fil'truyushhie materialy i fil'try na ikh osnove: proceedings / Tsebrenko M. V. et al. Shhelkino, 2001. P. 629–634.
4. Water treatment device: pat. 2549240 RU. MPK C02F1/40, B01D25/00 / Demkov A. I. Published: 20.04.2015. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2549240C1/en>
5. Tieffilterpatrone und methode und vorrichtung zu deren herstellung: pat. DE69331102T2 DE, MPK B01D29/11B, B29C57/00, B01D39/16B4 / Szczepanski C., Aune M., Schneider J. Appl. No. DE1993631102; Filed: 19.08.1993; Published: 22.08.2002. 4 p.
6. Koaleszenzelement: pat. DE69723714D1 DE, MPK B01D39/16B4, B01D17/04H, B01D46/24, B01D46/00F20 / Whitney A. et al. Appl. No. DE1997623714; Filed: 30.09.1996; Published: 28.08.2003. 4 p.
7. Construction of filter (versions) and method of filtration: pat. RU2182509C2 RU, MPK IPC B01D 39/16 (2006.01) / Kalbaug B., Dadri D. J. Appl. No. RU2000109355A; Filed: 29.09.1997; Published: 20.05.2002. Bull. No. 12. 5 p.
8. Fil'troval'nyy element dlya zhidkikh i gazovykh sred: pat. 2326716 RU. MPK B01D 39/16 (2006.01) / Troyan D. A. Appl. No. 2006124622/15;

Filed: 20.01.2008; Published: 20.06.2008. Bull. No. 17. 5 p.

9. Tsebrenko M. V. Ul'tratonkie sinteticheskie volokna. Moscow: Khimiya, 1991. 241 p.

10. Vecherkovskaya A., Popereshnyak S. Mathematical modeling of the process of fluid filtration through a multi-layer filtering element // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 4, No. 3 (36). P. 9–13. doi:[10.15587/2312-8372.2017.109309](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.109309)

11. Vecherkovskaya A., Popereshnyak S. Comparative analysis of mathematical models forming filter elements // 2017 XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). 2017. doi:[10.1109/memstech.2017.7937545](https://doi.org/10.1109/memstech.2017.7937545)

12. Sementsov H. N., Davydenko L. I. Development of informative support for automatic antisurge protection system and regulation of gas pumping plant // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014. Vol. 4, No. 11 (70). P. 20–24. doi:[10.15587/1729-4061.2014.26311](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26311)

13. Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arranging the system of pollutant neutralization / Vambol S. et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, No.10 (87). P. 63–73. doi:[10.15587/1729-4061.2017.102314](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102314)

14. Venkatesh G. S., Deb A., Karmarkar A. Characterization and finite element modeling of montmorillonite/polypropylene nanocomposites // Materials & Design. 2012. Vol. 35. P. 425–433. doi:[10.1016/j.matdes.2011.09.038](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.038)

15. Bhavana B., Tejaswini K. Analytical Study of Reinforced Concrete Element Strengthened With Polypropylene Fibers Subjected to Elevated Temperature // International Journal of Engineering Research and Advanced Technology. 2017. Vol. 3, No. 10. P. 1–8. doi:[10.7324/ijerat.2017.3143](https://doi.org/10.7324/ijerat.2017.3143)

16. Parametric optimization of extruded polypropylene rod and its investigation using finite element analysis / Parminder S. et al. // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2017. Vol. 6, No. 7. P. 79–84. doi:[10.15623/ijret.2017.0607014](https://doi.org/10.15623/ijret.2017.0607014)

17. Canevarolo S. V., Babetto A. C. Effect of screw element type in degradation of polypropylene upon multiple extrusions // Advances in Polymer Technology. 2002. Vol. 21, No. 4. P. 243–249. doi:[10.1002/adv.10028](https://doi.org/10.1002/adv.10028)

18. Shan M. J., Wang R., Zhang Q. Q. Finite Element Analysis of Flexural Property of Short Flax Fiber Reinforced Polypropylene Composites // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 476–478. P. 579–582. doi:[10.4028/www.scientific.net/amr.476-478.579](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.476-478.579)

19. Kmetty A., Barany T., Karger-Kocsis J. Injection moulded all-polypropylene composites composed of polypropylene fibre and polypropylene based thermoplastic elastomer // Composites Science and Technology. 2012. Vol. 73. P. 72–80. doi:[10.1016/j.compscitech.2012.09.017](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.09.017)

20. Cho K., Li F., Choi J. Crystallization and melting behavior of polypropylene and maleated polypropylene blends // Polymer. 1999. Vol. 40, No. 7. P. 1719–1729. doi:[10.1016/s0032-3861\(98\)00404-2](https://doi.org/10.1016/s0032-3861(98)00404-2)

21. Panumati S., Amornsakchai T., Ramesh C. F-9 high strength polypropylene

fiber from polypropylene/clay composite(Session: Composites II) // The Proceedings of the Asian Symposium on Materials and Processing. 2006. Vol. 2006. P. 124. doi:[10.1299/jsmeasmp.2006.124](https://doi.org/10.1299/jsmeasmp.2006.124)

22. Torikai A., Suzuki K., Fueki K. Photodegradation of polypropylene and polypropylene containing pyrene // Polymer Photochemistry. 1983. Vol. 3, No. 5. P. 379–390. doi:[10.1016/0144-2880\(83\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0144-2880(83)90051-9)

23. Darcy, H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris, 1856. 647 p.

24. Basniev K. S., Dmitriev N. M., Rozenberg G. D. Gryazegazovaya gidromekhanika: handbook. Moscow-Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2005. 544 p.

25. Wriggers, P. Nonlinear Finite Element Methods. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008. 560 p. doi:[10.1007/978-3-540-71001-1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-71001-1)