

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І  
АРХІТЕКТУРИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І  
АРХІТЕКТУРИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КРАВЧУК ОЛЕКСАНДР АНДРІЙОВИЧ**

УДК 628.16.067

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ФІЛЬТРУВАННЯ РІДИНИ ЗІ ЗМІННОЮ ШВИДКІСТЮ РУХУ**  
**ПОТОКУ**

Спеціальність: 05.23.04 – водопостачання, каналізація

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ О.А. Кравчук

Науковий керівник Поляков Вадим Леонтійович, доктор технічних наук,  
професор

Київ – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Кравчук О.А.* Фільтрування рідини зі змінною швидкістю руху потоку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.04 “Водопостачання, каналізація”. – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності роботи швидких фільтрів з зернистою засипкою, які працюють зі швидкістю, що змінюється з часом.

Представлено аналітичний огляд стану проблеми моделювання процесу фільтрування через зернисте завантаження. Висвітлено основні математичні моделі, які описують даний процес. Проаналізовано диференційні рівняння, які описують динаміку процесу видалення забруднень зернистим матеріалом та рух рідини у пористому зернистому середовищі, визначено розрахункові режими роботи фільтрів.

Дослідженням роботи швидких фільтрів протягом тривалого часу займалися такі вчені: Д.Н. Мінц, Ю.М. Шехтман, Є.В. Венеціанов, Л.А. Кульський, О.Я. Олійник, А.Я. Аюкаєв, П.А. Грабовський, В.Л. Поляков, А.М. Фоміних, М.Г. Журба, Н.Е. Hudson, D.A. Cornwel, K.J. Ives, J. Kozeny та ін.

Проведений літературний аналіз показав, що на сьогоднішній день існує достатня кількість моделей, які описують процес фільтрування, в тому числі зі змінною швидкістю з часом. Проте, більшість існуючих розв’язків були отримані чисельними методами і відносились до випадку постійного перепаду напору в шарі завантаження, що не завжди відповідає практиці фільтрування.

На основі виконаного аналізу теоретичних і експериментальних досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених показано необхідність вдосконалення існуючих моделей фільтрування та методик інженерного розрахунку основних параметрів процесу фільтрування зі змінною з часом швидкістю.

В роботі представлена математична модель фільтрування води на швидких фільтрах із зернистим завантаженням, яка застосовується для випадку змінної з часом швидкості фільтрування. Згідно з нею загальний час прояснення суспензії при фільтруванні умовно розбивається на три стадії – дві короточасні початкові і основну. Для першої стадії характерно утворення і переміщення вниз по завантаженню фронту насичення, який розділяє його на ділянки з заповненими і незаповненими сирою водою порами. Друга стадія характеризується інтенсивним накопиченням сирі води вище поверхні завантаження через недостатню пропускну здатність поки що фактично замуленого пористого середовища.

Протягом перших двох стадій фільтр фактично тільки підготовлюється до основної третьої стадії прояснення суспензії. Через їх коротку тривалість вони суттєво не впливають на процес прояснення води на швидких фільтрах.

Запропонована математична модель прояснення суспензії фільтруванням зі змінною швидкістю протягом третьої стадії складається з трьох взаємопов'язаних блоків: прояснювального, фільтраційного і гідравлічного. Перший прояснювальний блок включає в себе рівняння масопереносу та лінійної кінетики масообміну. Другий фільтраційний блок включає рівняння руху води в пористому завантаженні і рівняння зміни гідравлічного опору його матеріалу та рівняння дольового вмісту твердих частинок в осаді. Третій гідравлічний блок складається із залежностей, що описують втрати напору в комунікаціях і динаміку зміни рівня вихідної води.

В результаті розв'язку прийнятої вихідної математичної моделі отримано зручні безрозмірні математичні залежності для розрахунку концентрацій забруднень та осаду за висотою фільтра, зависі у фільтраті при постійній та змінній швидкості фільтрування; рівня непроясненої води над завантаженням і швидкості фільтрування; часу ефективної роботи фільтра (тривалості фільтроциклу); раціональної висоти фільтруючого завантаження.

Описано методики проведення експериментальних досліджень та математичної обробки отриманих результатів. Здійснено планування експериментальних досліджень. Дослідження фільтрування води проводилось на експериментальній установці, яка була запроектована з врахуванням критеріїв подібності і змонтована в лабораторії кафедри водопостачання та водовідведення Київського національного університету будівництва і архітектури.

Представлено результати експериментальних досліджень процесу фільтрування суспензії через зернисте завантаження, а також здійснено аналіз отриманих даних.

Проведено вимірювання втрат напору в завантаженні фільтра як при пропуску чистої води, так і при наявності певної концентрації забруднень в ній. З'ясовано, що підвищення швидкості фільтрування призводить до суттєвого збільшення втрат напору. Також очевидне збільшення втрат напору з часом. Причому, зафіксовано їх лінійне зростання в усіх досліджуваних випадках, що свідчить про ламінарний режим руху рідини через зернисте завантаження фільтра. Аналіз отриманих даних підтверджує це твердження, що протягом всього періоду фільтрування основні втрати напору мають місце у верхніх за напрямком руху води шарах завантаження. В наступних, за товщиною завантаження створах, втрати напору різко зменшуються.

Очевидно, що збільшення втрат напору в тілі фільтра при русі рідини через його зернисте завантаження викликає збільшення гідравлічного похилу і підвищення висоти шару води над ним.

При проведенні експериментів визначався також характер зміни коефіцієнта фільтрації з часом і за висотою (довжиною) завантаження при різних швидкостях фільтрування і початкових концентраціях забруднень. Найбільш інтенсивне зменшення коефіцієнта фільтрації за висотою завантаження відбувається в першому за рухом рідини створі. Чим далі розташований створ від початкового, тим ця зміна зменшується і стає найменшою в останньому нижньому шарі. У всіх створах найбільш інтенсивне

зменшення відповідного відносного коефіцієнта фільтрації має місце в початкові періоди роботи фільтра. Протягом часу ця інтенсивність знижується.

Наступним важливим етапом при проведенні досліджень були вимірювання закономірностей зміни концентрації забруднень у фільтрованій воді в часі як в різних перерізах за висотою фільтра, так і в його кінцевому перерізі. Максимальний ступінь очистки має місце в початкових перерізах фільтра. З глибиною завантаження інтенсивність очищення різко зменшується і має мінімальне значення в кінцевих перерізах. Відмічається, що в початкові періоди роботи фільтра, максимальне значення інтенсивності має місце на глибині завантаження до 0,3 м. Протягом певного часу інтенсивність очистки на початкових ділянках фільтра зменшується і більш інтенсивно починають працювати шари в глибині завантаження. В кінцеві періоди роботи початкові ділянки практично виключаються з роботи. За результатами вимірювань також можна зробити висновок, що збільшення швидкості фільтрування призводить до зменшення терміну фільтроциклу.

В ході експериментів була виконана серія досліджень по визначенню концентрації затриманих завантаженням забруднень. Заміри показали, що основна маса забруднень затримується у верхніх шарах фільтра протягом всього часу його роботи. Розподіл маси забруднень за висотою шару завантаження залежить від типу зернистого фільтруючого завантаження, виду забруднень, які видаляються при очистці, часу роботи споруди.

В процесі фільтрування при затриманні частинок забруднень відбувається їх накопичення в пустотах між частинками завантаження. Це призводить до зменшення об'єму пустот, тобто, до зменшення пористості фільтруючого матеріалу. Збільшення відносного об'єму осаду  $\Delta n/n_0$  (зменшення вільного порового простору завантаження  $\Delta n$ ) за рахунок впливу затриманих частинок забруднень, викликає суттєве зменшення коефіцієнта фільтрації зернистого завантаження. Було підтверджено той факт, що збільшення величини концентрації затриманих забруднень  $S$  призводить до

збільшення  $\Delta n/n$  і  $\Delta n$ . При досягненні певного значення концентрації затриманого осаду  $S$  (в нашому випадку  $S = 30$  г/дм<sup>3</sup>) підвищення відносного питомого об'єму осаду більше величини  $\Delta n/n_0=0,65$  (зменшення пористості фільтрувального завантаження) не відмічається. Це означає, що насиченість порового простору забрудненнями на даній ділянці фільтруючого завантаження, досягла свого граничного значення і на ній, при подальшій роботі фільтра, освітлення суспензії практично не відбувається.

При аналізі і математичному описанні фільтраційних процесів, які мають місце при очистці води, важливою характеристикою затриманого осаду служить відношення об'ємної концентрації осаду до об'ємної концентрації твердих частинок в цьому осаді  $\gamma = C_{oc}/C_m$ . Даний показник також можна виражати через масові концентрації затриманого осаду і твердої фази. З проведених досліджень слідує, що при збільшенні відносного питомого об'єму осаду, відбувається ущільнення осаду, що чисельно відображається відповідним зменшенням показника  $\gamma$ .

При проведенні експериментальних досліджень головна увага приділялась аналізу характеристик процесу фільтрування, які мають місце при змінній з часом швидкості руху рідини. З'ясовано, що при конкретній заданій початковій і кінцевій концентрації забруднень, існує відповідна оптимальна величина початкової швидкості фільтрування, при якій термін фільтроциклу буде максимальним.

На основі обробки отриманих в даній роботі експериментальних даних, для розглянутих умов вдалося отримати величину коефіцієнтів прилипання і відриву частинок забруднень до частинок матеріалу завантаження, а також показників степені, які входять у вихідні залежності:  $a_V = 6,65 \pm 0,3$ ;  $l = 0,8 \pm 0,04$ ;  $\beta_V = 0,025 \pm 0,001$ ;  $q = 0,9 \pm 0,05$ .

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено інженерну методику розрахунку швидких фільтрів, які працюють зі змінною з часом швидкістю та запропоновано рекомендації щодо визначення інтенсивності видалення забруднень очисною спорудою, часу фільтроциклу та товщини

фільтруючого шару зернистого завантаження. Що дозволило підвищити ефективність роботи фільтрів, а також збалансувати і регламентувати їх роботу.

Розроблено конструкцію системи трубопроводів для подачі і розподілу води в даній фільтрувальній споруді.

Результати дисертаційної роботи впроваджені при проектуванні швидких фільтрів для очистки води в робочі проекти ТОВ “Юнібуд Енерго сервіс” м. Київ, а також в проекти ТОВ “ПОБІ Вотер Інжиніринг” м. Київ.

#### **Наукова новизна роботи:**

- удосконалено фізичну модель процесу вилучення забруднень на швидких фільтрах з зернистою засипкою, яка враховує вплив змінної з часом швидкості фільтрування;
- обґрунтовано та побудовано математичну модель прояснення суспензії фільтруванням зі змінною швидкістю, яка дозволяє оцінити вплив різних факторів і вихідних характеристик на процес очистки;
- на підставі реалізації запропонованої математичної моделі розроблено аналітичні методи розрахунку основних конструктивних і технологічних параметрів швидких фільтрів із зернистим завантаженням;
- з використанням дослідних даних і спеціальних методик їх обробки визначено основні параметри і коефіцієнти, необхідні для розрахунку даних споруд.

**Ключові слова:** швидкий фільтр, фільтрування, суспензія, фільтруюче завантаження, фільтрат, фільтроцикл, осад.

### **АННОТАЦІЯ**

*Кравчук А.А.*, Фильтрование жидкости с переменной скоростью движения потока. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.04 “Водоснабжение, канализация”. – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной проблемы повышения эффективности работы скорых фильтров с зернистой засыпкой, которые работают с переменной во времени скоростью.

Представлен аналитический обзор состояния проблемы моделирования процесса фильтрования через зернистую загрузку. Рассмотрены основные математические модели, которые описывают данный процесс. Проанализированы дифференциальные уравнения, которые описывают динамику процесса удаления загрязнений зернистым материалом и движение жидкости в пористой зернистой среде, определены расчетные режимы работы фильтров.

Исследованием работы скорых фильтров на протяжении длительного времени занимались такие ученые: Д.Н. Минц, Ю.М. Шехтман, Е.В. Венецианов, Л.А. Кульский, А.Я. Олейник, А.Я. Аюкаев, П.А. Грабовский, В.Л. Поляков, А.М. Фоминых, М.Г. Журба, Н.Е. Hudson, D.A. Cornwel, K.J. Ives, J. Kozeny и др.

Проведенный литературный анализ показал, что на сегодняшний день существует достаточное количество моделей, которые описывают процесс фильтрования, в том числе с переменной во времени скоростью. Однако, большинство существующих решений были получены численными методами и относились к случаю постоянного перепада напора в слое загрузки, что не всегда отвечает практике фильтрования.

На основании выполненного анализа теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных ученых показано необходимость усовершенствования существующих моделей фильтрования и методик инженерного расчета основных параметров процесса фильтрования с переменной во времени скоростью.



В работе представлена математическая модель фильтрования воды на скорых фильтрах с зернистой загрузкой, которая используется для случая переменной во времени скорости фильтрования. При этом общее время осветления суспензии при фильтровании условно разбивается на три стадии – две кратковременные начальные и основную. Для первой стадии характерно образование и перемещение вниз по загрузке фронта насыщения, который разделяет его на участки с заполненными и незаполненными сырой водой порами. Вторая стадия характеризуется интенсивным накоплением сырой воды выше поверхности загрузки из-за недостаточной пропускной способности пока что фактически незаиленной пористой среды.

На протяжении первых двух стадий фильтр фактически только подготавливается к основной третьей стадии осветления суспензии. Из-за своей короткой продолжительности они существенно не влияют на процесс осветления воды на скорых фильтрах.

Предложенная математическая модель осветления суспензии фильтрованием с переменной скоростью на протяжении третьей стадии состоит из трех взаимосвязанных блоков: осветлительного, фильтрационного и гидравлического. Первый осветлительный блок включает в себя уравнение массопереноса и линейной кинетики массообмена. Второй фильтрационный блок включает уравнение движения воды в пористой загрузке, уравнение изменения гидравлического сопротивления ее материала и уравнение долевого содержания твердых частиц в осадке. Третий гидравлический блок состоит из зависимостей, которые описывают потери напора в отводящих коммуникациях и динамику изменения уровня исходной воды.

В результате решения принятой исходной математической модели получены удобные безразмерные математические зависимости для расчета концентраций загрязнений и осадка по высоте фильтра, взвеси в фильтрате при постоянной и переменной скорости фильтрования; уровня неосветленной

воды над загрузкой и скорости фильтрования; времени эффективной работы фильтра (длительности фильтроцикла); рациональной высоты фильтрующей загрузки.

Описаны методики проведения экспериментальных исследований и математической обработки полученных результатов. Выполнено планирование экспериментов. Исследования фильтрования воды проводились на экспериментальной установке, которая была запроектирована с использованием критериев подобия и смонтирована в лаборатории кафедры водоснабжения и водоотведения Киевского национального университета строительства и архитектуры.

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса фильтрования суспензии через зернистую загрузку, а также выполнен анализ полученных данных.

Проведены измерения потерь напора в загрузке фильтра как при пропуске чистой воды, так и при наличии определенной концентрации загрязнений в ней. Выяснено, что повышение скорости фильтрования приводит к существенному увеличению потерь напора. Также очевидно повышение потерь напора со временем. Причем, зафиксирован их линейный рост во всех исследуемых случаях, что свидетельствует о ламинарном режиме движения жидкости через зернистую загрузку фильтра. Анализ полученных данных подтверждает утверждение, что на протяжении всего периода фильтрования основные потери напора имеют место в верхних по направлению движения воды слоях загрузки. В следующих по толщине загрузки створах потери напора резко уменьшаются.

Очевидно, что увеличение потерь напора в теле фильтра при движении жидкости через его зернистую загрузку вызывает увеличение гидравлического уклона и повышение высоты слоя воды над ним.

При проведении экспериментов определялся также характер изменения коэффициента фильтрации со временем и по высоте (длине) загрузки при разных скоростях фильтрования и начальных концентрациях загрязнений.

Наиболее интенсивное уменьшение коэффициента фильтрации по высоте загрузки происходит в первом по направлению движения жидкости створе. Чем дальше расположен створ от начального, тем это изменение уменьшается и становится наименьшим в последнем нижнем слое. Во всех створах наиболее интенсивное уменьшение соответствующего относительного коэффициента фильтрации имеет место в начальные периоды работы фильтра. Со временем эта интенсивность снижается.

Следующим важным этапом при проведении исследований были измерения закономерностей изменения концентраций загрязнений в фильтруемой воде со временем как в разных сечениях по высоте фильтра, так и в его конечном сечении. Максимальная степень очистки имеет место в начальных сечениях фильтра. По глубине загрузки интенсивность очистки резко уменьшается и имеет минимальное значение в конечных сечениях. Отмечается, что в начальные периоды работы фильтра максимальное значение интенсивности имеет место на глубине загрузки до 0,3 м. На протяжении определенного времени интенсивность очистки на начальных участках фильтра уменьшается и более интенсивно начинают работать слои в глубине загрузки. В конечные периоды работы начальные участки практически выключаются из работы. По результатам измерений также можно сделать вывод, что увеличение скорости фильтрования приводит к уменьшению длительности фильтроцикла.

В ходе экспериментов была выполнена серия исследований по определению концентраций задержанных загрузкой загрязнений. Замеры показали, что основная масса загрязнений задерживается в верхних слоях фильтра на протяжении всего времени его работы. Распределение массы загрязнений по высоте слоя загрузки зависит от типа зернистой фильтрующей загрузки, вида загрязнений, которые удаляются при очистке, и времени работы сооружения.

В процессе фильтрования при задержании частиц загрязнений происходит их накопление в пустотах между частицами загрузки. Это

приводит к уменьшению объема пустот, т.е., к уменьшению пористости фильтрующего материала. Увеличение относительного объема осадка  $\Delta n/n_0$  (уменьшение свободного порового пространства загрузки  $\Delta n$ ) за счет влияния задержанных частиц загрязнений, вызывает существенное уменьшение коэффициента фильтрации зернистой загрузки. Было подтверждено утверждение, что увеличение величины концентрации задержанных загрязнений  $S$  приводит к увеличению  $\Delta n/n$  и  $\Delta n$ . При достижении некоторого значения концентрации задержанного осадка  $S$  (в нашем случае  $S=30$  г/дм<sup>3</sup>) повышение относительного удельного объема осадка больше величины  $\Delta n/n_0=0,65$  (уменьшение пористости фильтрующей загрузки) не отмечается. Это означает, что насыщение порового пространства загрязнениями на данном участке фильтрующей загрузки, достигло своего граничного значения и на нем при дальнейшей работе фильтра, осветление суспензии практически не происходит.

При анализе и математическом описании фильтрационных процессов, которые имеют место при очистке воды, важной характеристикой задержанного осадка служит отношение объемной концентрации осадка к объемной концентрации твердых частиц в нем  $\gamma = C_{oc}/C_m$ . Данный показатель также можно выражать через массовые концентрации задержанного осадка и твердой фазы. Полученные данные свидетельствуют о том, что увеличение относительного удельного объема осадка приводит к его уплотнению, что численно выражается соответствующим уменьшением показателя  $\gamma$ .

При проведении экспериментальных исследований главное внимание уделялось анализу характеристик процесса фильтрования, которые имеют место при переменной во времени скорости движения жидкости. Выяснено, что при конкретной заданной начальной и конечной концентрации загрязнений, существует соответствующая оптимальная величина начальной скорости фильтрования, при которой время фильтроцикла будет максимальным.

На основе обработки полученных в данной работе экспериментальных данных, для рассматриваемых условий удалось получить величину коэффициентов прилипания и отрыва частиц загрязнений от частиц материала загрузки, а также показателей степени, которые входят в исходные зависимости:  $a_V = 6,65 \pm 0,3$ ;  $l = 0,8 \pm 0,04$ ;  $\beta_V = 0,025 \pm 0,001$ ;  $q = 0,9 \pm 0,05$ .

**Практическое значение полученных результатов.** Разработана инженерная методика расчета скорых фильтров, которые работают с переменной во времени скоростью и предложены рекомендации для определения интенсивности удаления загрязнений очистным сооружением, время фильтроцикла и толщины фильтрующего слоя зернистой загрузки. Это позволило повысить эффективность работы фильтров, а также сбалансировать и регламентировать их работу.

Разработана конструкция системы трубопроводов для подачи и распределения воды в данном фильтрующем сооружении.

Результаты диссертационной работы внедрены при проектировании скорых фильтров для очистки воды в рабочие проекты ТОВ “Юнібуд Енерго сервіс” г. Киев, а также в проекты ТОВ “ПОБІ Вотер Інжиніринг” г. Киев.

#### **Научная новизна работы:**

- усовершенствована физическая модель процесса удаления загрязнений на скорых фильтрах с зернистой засыпкой, которая учитывает влияние переменной во времени скорости фильтрования;
- обоснована и построена математическая модель осветления суспензии фильтрованием с переменной скоростью, которая позволяет оценить влияние различных факторов и исходных характеристик на процесс очистки;
- на основе реализации предложенной математической модели разработаны аналитические методы расчета основных конструктивных и технологических параметров скорых фильтров с зернистой загрузкой;

- с использованием опытных данных и специальных методик их обработки определены основные параметры и коэффициенты необходимые для расчета данных сооружений.

**Ключевые слова:** скорый фильтр, фильтрование, суспензия, фильтрующая загрузка, фильтрат, фильтроцикл, осадок.

## ABSTRACT

Kravchuk O.A. Fluid filtration under variable velocity of flow. – Manuscript.

The thesis is intended to obtain Candidate of Technical Sciences degree (PhD) within specialty 05.23.04 – water supply and sewage. – Kyiv National University of Construction and Architecture. – Kyiv, 2018.

Thesis work is dedicated to the actual problem of an increase in the effectiveness of rapid sand filters with granular medium operation.

An analytical review of the problem of filtering process through granular medium modeling has been presented. The literary analysis has shown that for today there is a sufficient number of models that describe the process of filtration, including with a variable velocity over time. However, most of the existing solutions were obtained by numerical methods and related to the case of constant head difference in the filtration layer, which does not always correspond to the filtering practice.

On the basis of the performed analysis of theoretical and experimental studies by domestic and foreign scientists, it is shown that there is a necessity to improve the existing filtration models and techniques for engineering calculation of the main parameters of the filtering process with variable velocity over time.

A mathematical model of water filtration on rapid filters with granular medium is presented in the thesis, which is used for the case of a time-varying filtration velocity. According to it, the total time of suspension clarification during filtration is conditionally divided into three stages – two short-term initial and basic. During the first two stages, the filter is in fact only prepared for the main third stage

of the suspension clarification. Due to their short duration, they do not significantly affect the process of water clarification on rapid filters.

The three-block mathematical model of water filtration on rapid sand filters with granular medium for the case of variable velocity over time on the third stage is adduced. It includes relations for describing the clarification process of the purified liquid, the equations of the filtration block and the relations determining the flow hydraulics. An original analytical solution of the initial system of differential equations has been proposed and on its basis quite simple relations have been obtained to calculate the main technological and constructive characteristics of the studied structures, including the degree of purification, the duration of the filtration cycle, the thickness of the granular medium layer.

Techniques for experimental studies and mathematical processing of the obtained results were described. The experiments were planned. Series of experimental studies of the rapid filters operation on a laboratory installation has been carried out and the obtained results have been analyzed. The nature of the filtration coefficient variation over time in the course of the filter operation has been defined, the value of the head loss in the filtration media, the change in the liquid level above the filling, the nature of the filtration velocity variation during the filtration cycle, and the retention of the contamination particles have been determined. Particular studies on the analysis of the process of accumulation of contaminants with respect to time and medium height, including changes in their concentration and relative saturation of pore space have been performed. It was determined that the bulk of the impurities was retained at the height of the medium layer up to 0.3 m thick.

Based on the processing of the experimental data, empirical formulas and necessary parameters for calculation of the coefficients of adhesion and suffosion of contamination particles from the particles of the filtering filling have been obtained. The method of rapid sand filters engineering calculation which function under variable filtration velocity over time was elaborated, examples of calculation were considered. The comparative analysis of the data, obtained in the work, with

calculation data according to the existing methods was completed. The materials of the thesis work results implementation on real treatment structures calculation and designing were substantiated.

**The practical value of the results obtained.** An engineering method for rapid filters calculation that operate at a variable velocity with time has been developed, and recommendations for determining the rate of contaminants removal by the treatment plant, the filter cycle time and the thickness of the filter bed of granular medium have been proposed. It allowed to increase the efficiency of the filters, as well as to balance and regulate their work.

The design of pipeline system for the water supply and distribution in the presented filtering structure has been developed.

The results of the thesis have been implemented in the designing of rapid filters for water purification in the projects of companies “Yunibud Energo Servis” (“Юнібуд Енерго Сервіс”), Kyiv, as well as in the projects "POBI Water Engineering" (“ПОБІ Вотер Інжиніринг”), Kyiv.

**The scientific novelty of the work:**

- the physical model of the process of removing contaminants on rapid filters with granular filling has been improved. It takes into account the effect of time-varying filtering velocity;
- the mathematical model of the suspension clarification with a variable filtration velocity has been substantiated and constructed. It allows to estimate the influence of various factors and initial characteristics on the purification process;
- based on the implementation of the process mathematical model analytical methods for calculation the main constructive and technological parameters of rapid filters with granular medium have been developed;
- using the experimental data and special methods for their processing, the main parameters and coefficients necessary for the calculation of these structures have been determined.

**Keywords:** rapid filter, filtration, suspension, filtration cycle, filtration material, filtrate, sediment.



## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kravchuk O. Functioning of filter structures in changing velocity conditions over time // Underwater technologies. Industrial and civil engineering (Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія). К., 2017. – Вип. 6. – С. 65-73.

2. Поляков В.Л. Математическое моделирование осветления суспензии фильтрованием с существенно переменной скоростью. / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Вісник ОДАБА. – Одеса: Optimum, 2015. – Вип. 59. – С. 228 – 235.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в проведенні порівняльного аналізу запропонованої і існуючих фізичних і математичних моделей, які описують роботу фільтрів зі змінною в часі швидкістю фільтрування.

3. Поляков В.Л. О гидравлике водоочистных безнапорных фильтров на начальных стадиях фильтрования / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2015. – Вип. 25. – С. 223 – 231.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в аналізі розрахункових залежностей і графіків та оцінці факторів, які впливають на характер роботи споруд в початкові періоди фільтрування.

4. Кравчук О.А. До зміни гідравлічних характеристик зернистого завантаження фільтрів в процесі їх роботи // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2016. – Вип. №2 (84). – С. 316 – 319.

5. Кравчук О.А. Дослідження гідравлічного опору завантаження фільтрів // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2016. – Вип. 27. – С. 208 – 213.

6. Кравчук О.А. До розрахунку дії параметрів швидкого фільтра при істотній зміні швидкості фільтрування // Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 63. – С. 215-221.

7. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження зміни швидкості фільтрування під час роботи швидкого фільтра // Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 64. – С. 135-141.

8. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження втрат напору під час роботи швидкого фільтра зі змінною з часом швидкістю фільтрування // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. К.: КНУБА, 2017. – Вип. 89. – С. 56-62.

9. Поляков В. Л. Теоретические исследования технологических и конструктивных параметров при фильтровании с изменяющейся во времени скоростью / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Чиста вода. Фундаментальні, практичні та промислові аспекти. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. – К.: НТУУ “КПІ”, 2015. – С. 167 – 170.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в проведенні математичних розрахунків параметрів фільтрації при роботі споруд зі змінною швидкістю.

10. Поляков В.Л. Розрахунок освітлення слабokonцентрованої суспензії на швидких фільтрах при значній зміні з часом швидкості фільтрування / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Матеріали 71-ї науково-технічної конференції. 15-17 березня 2016 р. – Харків: ХНУБА, 2016. – С. 37.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає у виконанні розрахунків розглядуваних споруд при різних параметрах очищуваної рідини.

11. Поляков В.Л. Про деякі результати теоретичних і експериментальних досліджень дії водоочисних фільтрів при змінній з часом швидкості фільтрування / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Тези за матеріалами VII Всеукраїнського наукового семінару “Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур”. 11-12 жовтня 2016 р. – Харків: ХНУБА, 2016. – С. 18-20.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в обробці даних існуючих експериментальних досліджень і порівнянні їх з результатами розрахунків.

12. Патент України на винахід №112509. Фільтр для очищення води / Юрков Є.В., Кравчук О.А., Юрков О.Д.; заявл. 28.09.2015; Опубл. 12.09.2016, Бюл. №17.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в розробці конструкції системи трубопроводів для подачі і розподілу води у фільтрувальній споруді.

<b>З М І С Т</b>	<b>Стор.</b>
АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	23
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ОЧИСТКИ</b>	
<b>ВОДИ ФІЛЬТРУВАННЯМ .....</b>	<b>28</b>
1.1. Загальна характеристика фільтрів.....	28
1.2. Характеристика зернистого матеріалу завантаження фільтра..	30
1.3. Аналіз математичних моделей, які характеризують динаміку процесу видалення забруднень зернистим матеріалом.....	32
1.4. Диференціальні рівняння руху рідини в пористому зернистому середовищі.....	50
1.5. Визначення розрахункових режимів роботи фільтра.....	59
1.6. Висновки по розділу 1.....	64
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИСТКИ</b>	
<b>ВОДИ НА ФІЛЬТРАХ З ЗЕРНИСТОЮ ЗАСИПКОЮ.....</b>	<b>66</b>
2.1. Загальні положення.....	66
2.2. Математична модель очистки і руху води на фільтрах з зернистою засипкою.....	68
2.2.1. Основні характеристики роботи очисного фільтра протягом першої стадії фільтрування .....	68
2.2.2. Основні характеристики роботи очисного фільтра протягом другої стадії фільтрування.....	71
2.2.3. Основні характеристики роботи очисного фільтра протягом третьої стадії фільтрування .....	73
2.3. Розрахунок часу ефективної роботи фільтра.....	84
2.4. Теоретичне обґрунтування раціональної висоти фільтруючого завантаження.....	88
2.5. Висновки по розділу 2.....	93

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ШВИДКИХ ФІЛЬТРІВ .....	95
3.1. Задачі експериментальних досліджень.....	95
3.2. Умови фізичного моделювання процесів руху і очистки води на швидких фільтрах.....	96
3.3. Планування експерименту.....	100
3.4. Експериментальна установка та методика проведення досліджень.....	105
3.5. Математична обробка результатів досліджень.....	116
3.6. Висновки по розділу 3.....	120
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ АНАЛІЗ.....	122
4.1. Результати досліджень втрат напору в тілі фільтра.....	122
4.2. Визначення ефекту очистки при різних початкових концентраціях забруднень, швидкостях фільтрування і часу роботи фільтра.....	131
4.3. Залежність пористості фільтруючого матеріалу від концентрації затриманих забруднень.....	136
4.4. Зміна швидкості фільтрування протягом часу роботи фільтра	140
4.5. Визначення коефіцієнтів прилипання $\alpha$ і відриву $\beta$ .....	145
4.6. Висновки по розділу 4.....	148
РОЗДІЛ 5. АПРОБАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДИК І ОЦІНКА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	150
5.1. Методика інженерного розрахунку швидких фільтрів.....	150
5.2. Приклади розрахунку швидких фільтрів.....	152
5.3. Порівняльна оцінка ефективності запропонованих розв'язків.	158
5.4. Висновки по розділу 5.....	164
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	167
ДОДАТКИ.....	182

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$C, C_0, C_e$  – поточна, вихідна, кінцева об'ємні концентрації завислих частинок,  $\text{дм}^3/\text{дм}^3$ ;

$H_m$  – відмітка рівня сирії води над завантаженням в кінці другої і на початку третьої стадії, м;

$H_w$  – відмітка рівня сирії води над завантаженням протягом третьої стадії, м;

$H_{wi}$  – відмітка рівня сирії води над завантаженням протягом  $i$ -ої стадії, м;

$H_{w2}^0$  – відмітка рівня сирії води над завантаженням на початку другої стадії, м;

$H_{out}$  – напір в колекторі фільтрату, м;

$h$  – п'єзометричний напір в завантаженні на третій стадії, м;

$h_i$  – п'єзометричний напір в завантаженні на  $i$ -ій стадії, м;

$I_0$  – функція Бесселя уявного аргумента першого роду нульового порядку;

$k, k_0$  – поточний і вихідний коефіцієнти фільтрації завантаження, м/год;

$L$  – висота шару завантаження, м;

$l, q$  – показники степеня у виразах для  $\alpha(v), \beta(v)$ ;

$n_0$  – пористість чистого завантаження;

$Q_{in}$  – витрата сирії води, що подається на фільтр,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$R$  – опір відвідних комунікацій, м;

$S, S_s$  – об'ємні концентрації осаду й осаджених частинок суспензії,  $\text{дм}^3/\text{дм}^3$ ;

$t$  – час, с;

$t_f$  – тривалість фільтроциклу, год;

$t_p$  – час захисної дії шару завантаження, год;

$t_v$  – час зниження швидкості фільтрування до гранично допустимої величини, год;

$t_H$  – час досягнення максимального рівня води над завантаженням, год;

$V$  – швидкість фільтрування на третій стадії, м/год;

$V_i$  – швидкість фільтрування на  $i$ -ій стадії, м/год;

$V^*$  – гранично допустима швидкість фільтрування, м/год;

$z_w, z_d$  – відмітки верхньої і нижньої поверхні завантаження, м;

$z$  – вертикальна координата, м;

$\alpha, \beta$  – коефіцієнти швидкостей прилипання й відриву частинок забруднення,  $m^{-1}$ ;

$\alpha_V, \beta_V$  – приведені коефіцієнти швидкостей прилипання й відриву частинок суспензії;

$\gamma$  – відношення концентрації осаду й осаджених частинок в ньому;

$\Delta h_0$  – масштаб напору;

$\omega$  – площа входної поверхні завантаження,  $m^2$ ;

$C_{e^*}$  – гранично допустима об'ємна концентрація завислих частинок в кінцевому перерізі фільтра,  $dm^3/dm^3$ ;

$z_f$  – відмітка фронту насичення, м;

$t, t_{np}$  – тривалість промивки, простою фільтра при промивці, год;

$\rho, \rho_{зал}$  – густина осаду в пористому просторі при фільтруванні та після промивки,  $kg/m^3$ ;

$\rho_w$  – густина води;

$\mu$  – динамічна в'язкість,  $Pa \cdot s$ ;

$\nu$  – кінематична в'язкість,  $m^2/s$ ;

$d_e$  – еквівалентний діаметр зерен, мм;

$V_0$  – початкова швидкість фільтрування, м/год;

$D_k$  – доза коагулянту,  $mg/dm^3$ ;

$Re$  – критерій Рейнольдса;

$Eu$  – критерій Ейлера;

$Fr$  – критерій Фруда.

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Води природних джерел підготовлюються для господарсько-питних потреб населення та потреб промислових підприємств за різними технологічними схемами з метою приведення їх фізико-хімічних показників у відповідність до вимог споживачів. Одним із основних елементів цих схем є швидкі фільтри з зернистою засипкою, які дають змогу затримувати найменші завислі й колоїдні частинки з води в пористому середовищі.

Погіршення якісних показників води природних джерел, підвищення вимог до якості води, що очищається, вимагає інтенсифікації роботи фільтрувальних споруд, підвищення їх продуктивності і розробки надійних методик розрахунку.

В Україні, як і за кордоном, більшість швидких фільтрів, які застосовуються у схемах очистки води для господарсько-побутових та промислових потреб, працюють зі швидкістю, яка істотно змінюється з часом. Проте, до даного часу не запропоновано достатньо обґрунтованих і точних математичних моделей, які б описували даний процес. Це пов'язано із складністю вихідних математичних залежностей і аналітичних методів для їх розв'язку. Тому в існуючих моделях використано значну кількість, часто не завжди достатньо обґрунтованих, спрощень і припущень. Окрім цього, необхідно відзначити, що в даний час накопичено явно недостатній масив експериментальних даних по вивченню параметрів роботи швидких фільтрів, які працюють при змінній в часі швидкості фільтрування. Практично всі відомі дослідження були присвячені вивченню роботи фільтрувальних споруд з постійною швидкістю фільтрування.

Оскільки робота швидких фільтрів в режимі змінної швидкості фільтрування має ряд суттєвих переваг в порівнянні з режимом постійної швидкості, то експериментальне дослідження відповідних характеристик таких споруд і розробка надійної теоретично обґрунтованої методики їх розрахунку є безумовно актуальним і своєчасним завданням. Вирішення цього

питання дасть можливість забезпечити стабільну роботу очисних споруд, на стадії розрахунку надійно визначати товщину шару завантаження і час фільтроциклу, протягом якого при заданій витраті буде забезпечуватись необхідна якість очистки води, що подається споживачам.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано згідно державної програми “Про концепцію розвитку водного господарства України”, вона безпосередньо пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури, які виконувались на замовлення Міністерства освіти і науки України (державний реєстраційний номер №0199u000598, №0199u000661).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є наукове обґрунтування та розробка більш надійних і досконалих методів розрахунку швидких фільтрів, що працюють зі швидкістю, яка істотно змінюється з часом, підвищення ефективності роботи даних споруд і інтенсивності видалення забруднень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз літературних джерел, в яких розглядаються закономірності процесу очистки води на швидких фільтрах з зернистим завантаженням при змінній швидкості фільтрування;
- обґрунтувати фізичну модель процесу вилучення забруднень на швидких фільтрах з зернистою засипкою;
- побудувати математичну модель процесу фільтрування для розглядуваного випадку і запропонувати методи її розв'язку;
- розробити конструкцію системи трубопроводів для подачі і розподілу води у фільтрувальній споруді;
- провести експериментальні дослідження основних характеристик досліджуваних споруд для різних режимів їх роботи;
- розробити інженерну методику розрахунку технологічних і конструктивних параметрів швидких фільтрів, які працюють при змінній швидкості фільтрування.



**Об'єкт дослідження** – швидкі водоочисні фільтри із зернистим завантаженням.

**Предмет дослідження** – основні технологічні та конструктивні параметри роботи швидких фільтрів зі швидкістю, яка істотно змінюється з часом, та тривалість фільтроциклу.

**Методи дослідження** – математичне і фізичне моделювання процесу фільтрування суспензії на швидких фільтрах при змінній з часом швидкості, використання аналітичних і чисельних методів розв'язку розглянутих задач, перевірка результатів теоретичних досліджень шляхом їх порівняння з отриманими експериментальними даними.

**Наукова новизна роботи:**

- удосконалено фізичну модель процесу вилучення забруднень на швидких фільтрах з зернистою засипкою, яка враховує вплив змінної з часом швидкості фільтрування;
- обґрунтовано та побудовано математичну модель прояснення суспензії фільтруванням зі змінною швидкістю, яка дозволяє оцінити вплив різних факторів і вихідних характеристик на процес очистки;
- на підставі реалізації запропонованої математичної моделі розроблено аналітичні методи розрахунку основних конструктивних і технологічних параметрів швидких фільтрів із зернистим завантаженням;
- з використанням дослідних даних і спеціальних методик їх обробки визначено основні параметри і коефіцієнти, необхідні для розрахунку даних споруд.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено інженерну методику розрахунку швидких фільтрів, які працюють зі змінною з часом швидкістю та запропоновано рекомендації щодо визначення інтенсивності видалення забруднень очисною спорудою, часу фільтроциклу та товщини фільтруючого шару зернистого завантаження, що дозволило підвищити ефективність роботи фільтрів, а також збалансувати і регламентувати їх роботу.

Розроблено конструкцію системи трубопроводів для подачі і розподілу води в даній фільтрувальній споруді.

Результати дисертаційної роботи впроваджені при проектуванні швидких фільтрів для очистки води в робочі проекти ТОВ “Юнібуд Енерго сервіс” м. Київ, а також в проекти ТОВ “ПОБІ Вотер Інжиніринг” м. Київ.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати, які викладені в дисертації, отримані особисто автором на основі проведення теоретичних і експериментальних досліджень. Здійснено обґрунтування запропонованих фізичної і математичної моделей видалення забруднень фільтруючим зернистим завантаженням і на цій основі розроблено рекомендації по розрахунку основних конструктивних і технологічних параметрів швидких фільтрів. Зокрема, отримано залежності для розрахунку терміну фільтроциклу і оптимальної товщини фільтруючого завантаження. Проведено експериментальні дослідження по визначенню параметрів і коефіцієнтів, які необхідні для виконання розрахунків досліджуваних споруд.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідались на науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2015 – 2017 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми водопостачання і водовідведення. Вода – 2015” (ОДАБА, м. Одеса, 2015); III Міжнародній науково-технічній конференції “Чиста вода. Фундаментальні та промислові аспекти” (НТУУ “КПІ”, м. Київ, 2015); I Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів “БудМайстерКлас” (КНУБА, м. Київ, 2015); II і III Міжнародних науково-практичних конференціях “Водокористування: технології, споруди, менеджмент” (КНУБА, м. Київ, 2015, 2016); 71-й науково-технічній конференції ХНУБА (м. Харків, 2016); VII Всеукраїнському науковому семінарі “Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур” (ХНУБА, м. Харків, 2016); III Міжнародній науково-практичній конференції

“Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія” (КНУБА, м. Київ, 2017).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 12 друкованих праць, в т.ч. 8 у фахових виданнях, 1 у міжнародному фаховому виданні, отримано 1 патент України на винахід.

**Структура і об’єм дисертації.** Дисертація складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 158 найменувань і додатків. Робота викладена на 168 сторінках, містить 46 рисунків, 1 таблицю.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ОЧИСТКИ ВОДИ ФІЛЬТРУВАННЯМ

### 1.1. Загальна характеристика фільтрів

Фільтри є одними з основних споруд, які застосовуються при очистці вод різного призначення. Як правило, вони встановлюються на завершальних етапах очистки для досягнення необхідного ступеня видалення забруднень [28, 31, 39]. Для забезпечення високої ефективності при експлуатації і в зв'язку з різним умовами роботи дані споруди потребують постійного удосконалення конструкції і методів їх розрахунку [9, 34, 99, 100].

В залежності від конструктивних і технологічних характеристик фільтри підрозділяються на: зернисті, сітчасті, тканеві, наливні, картриджні, волокнисті, мікрофільтри.

В свою чергу зернисті фільтри включають:

- адгезійні, для усунення каламутності і колірності;
- сорбційні, для усунення присмаків і запахів;
- катіоно- та аніонообмінні, для обміну катіонів та аніонів.

В практиці очистки води від колоїдних і завислих частинок забруднень при її підготовці для господарсько-питних і виробничих потреб споживачів, а також доочистки стічних вод, найбільш широко застосовуються зернисті адгезійні фільтри. В спеціальній технічній і науковій літературі [22, 33, 101] дані споруди класифікуються за такими основними ознаками:

1. Швидкістю фільтрування:

- повільні –  $V = (0,1 - 0,3)$  м/год;
- швидкі –  $V = (5 - 15)$  м/год;
- надшвидкі –  $V > 25$  м/год.

Швидкі фільтри, в свою чергу, розділяють на споруди з постійною швидкістю руху води і споруди, які працюють із швидкістю, що зменшується за товщиною завантаження або з часом.

2. Діючим напором:

- напірні;
- безнапірні (відкриті).

Повільні і швидкі фільтри, як правило, безнапірні, а надшвидкі – напірні.

3. Напрямок руху води:

- згори вниз – повільні, швидкі, надшвидкі;
- знизу вгору – контактні прояснювачі;
- згори вниз і знизу вгору одночасно – двопоточні (збір фільтрату відбувається в товщі фільтру);
- в горизонтальному напрямку – радіальні.

4. Крупністю засипки (завантаження):

- дрібнозернисті (0,2 – 0,5) мм;
- середньозернисті (0,5 – 0,8) мм;
- крупнозернисті (0,8 – 2,0) мм.

5. Кількістю фільтруючих шарів:

- одношарові – завантаження з одного матеріалу;
- дво- та багат шарові – завантаження складається з двох або кількох шарів фільтруючих матеріалів різної щільності.

6. Наявності попередньої обробки води:

- фільтрування з попереднім проясненням у відстійниках, прояснювачах та ін;
- пряме (контактне) фільтрування – вода з коагулянтном без попереднього прояснення надходить на фільтри.

7. Вагою засипки:

- важкі (засипка, що тоне у воді);
- плаваючі.

В даній роботі розглядаються швидкі фільтри, які працюють зі швидкістю руху води, що зменшується з часом.

## 1.2. Характеристика зернистого матеріалу завантаження фільтра

Відомо, що ефективність роботи зернистих фільтрів, в основному залежить від якості і характеристик фільтруючих матеріалів, що використовуються. При цьому всі типи завантажень, які застосовуються при підготовці води для господарсько-питних потреб мають забезпечувати виконання цілого ряду обов'язкових вимог. Однією з основних є відповідний гранулометричний склад. Форма зерен повинна бути близькою до кулястої або кубічної, наявність пластинчатих зерен неприпустима. Крупність і однорідність фільтруючого матеріалу визначається ситовим аналізом на ряді каліброваних сит.

До основних показників фільтруючого завантаження належать [1, 79]:

1. Еквівалентний діаметр зерен, який має важливе значення при розрахунку фільтруючого завантаження, визначається за формулою:

$$d_{ек} = \frac{100}{\sum \frac{\rho_i}{d_k}}, \quad (1.1)$$

де  $\rho_i$  – відсотковий вміст (за вагою) фракцій з середнім діаметром зерен  $d_k$  або, інакше кажучи, кількість зерен, що просіюються, в %, що залишились на ситі калібром  $d_k$ .

2. Коефіцієнт неоднорідності фільтруючого завантаження, який представляє собою відношення 80%-го калібру матеріалу до його 10%-го калібру (за вагою):

$$K = \frac{d_{80}}{d_{10}}. \quad (1.2)$$

В зернистому завантаженні фільтрів фракцій більших верхньої межі, яка вказана в проєкті не повинно бути більше 10%, а фракцій менших нижньої межі – не більше 5%.

3. Коефіцієнт форми [54]:

$$\alpha_{\phi} = \frac{F_n}{F_{\kappa}}, \quad (1.3)$$

де  $F_n$  – площа поверхні зерна;  $F_{\kappa}$  – площа поверхні кулі, рівновеликої за об'ємом зерну.

4. Питома поверхня ( $\omega$ , м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>) – сумарна площа поверхонь зерен, які містяться в 1 м<sup>3</sup> фільтруючого матеріалу:

$$\omega = \frac{6\alpha(1-n)}{d_{ек}}, \quad (1.4)$$

тут  $n$  – пористість – доля об'єму насипного фільтруючого матеріалу, яку займають пори. Пористість зернистого завантаження швидких фільтрів не повинна бути меншою 40%.

5. Потенціал протікання (мВ/см) – потенціал, який знаходиться на поверхні зерен при протіканні води.

6. Механічна міцність. Механічну міцність фільтруючих матеріалів оцінюють двома показниками – стираність (відсоток зносу матеріалу внаслідок тертя зерен одне об одного під час промивок) та подрібнення (відсоток зносу внаслідок розтріскування зерен) [43]. Наслідком цього є: підвищення гідравлічного опору фільтруючого завантаження через відкладення подрібнених зерен на його поверхні, що призводить до скорочення тривалості фільтроциклу та зниження продуктивності фільтру, а також винос цих подрібнених зерен при промивках та безповоротна втрата фільтруючого матеріалу. Задовільний з точки зору механічної міцності фільтруючий матеріал повинен мати умовну механічну міцність 1%, подрібнення не більше 4% та стираність не більше 0,5%.

7. Хімічна стійкість. Хімічно стійким матеріал має бути з двох причин: по-перше, щоб засипка фільтру не розчинялась у фільтрованій воді (щоб не

було втрат фільтруючого матеріалу й зменшення крупності зерен в процесі експлуатації), по-друге, щоб вода, що очищається, не збагачувалась шкідливими для здоров'я домішками, які вимиваються із зерен.

8. Санітарно-гігієнічні показники – радіоактивність, спектральний аналіз матеріалу і водної витяжки (кількість шкідливих домішок, вміст токсичних мікроелементів і можливий перехід їх у воду).

До 50-х років минулого століття основними фільтруючими зернистими засипками для очищення води були кварцові піски, що важчі за воду і тонуть в ній. Пористість пісків коливається від 34 до 50 відсотків, а коефіцієнт форми зерна від 1,17 до 1,87. У фільтрах пісок повинен містити не менше 96% кремнезему. Мінеральний склад пісків може бути полі- або мономінеральним. Звичайно, піски складаються з кварцу з домішками польових шпатів, слюди, глинистих, вапняних, залізистих часток. Склад мулистих, глинистих і пиловидних часток в піску не повинен перевищувати 0,1%. Колір пісків може бути жовтий, червоний, зелений, сірий. Саме останній – сірий найбільше відповідає вимогам до фільтруючих матеріалів [79].

Останнім часом до матеріалу, що традиційно використовується – кварцового піску, додалося багато нових матеріалів: антрацит, керамзит, аглопорит, шлакова пемза, погорілі породи, вулканічні шлаки, базальтові, мармурові та керамічні піски, завантаження із полістиролу та ін.

### **1.3. Аналіз математичних моделей, які характеризують динаміку процесу видалення забруднень зернистим матеріалом**

Вивченню загальних закономірностей руху рідини в пористому зернистому середовищі (фільтрації) присвячено досить велику кількість теоретичних та експериментальних досліджень вітчизняних і закордонних авторів. Найбільш вагомий внесок у вивчення особливостей процесу очистки води на фільтрах внесли такі вчені: Д.Н. Мінц [65, 66], Ю.М. Шехтман [114], Є.В. Венеціанов [10, 11], М.Н. Сисоєв [96], В.А. Клячко [44], Е.Ф. Кургаєв [56],



Л.А. Кульський [55], В.П. Криштул [53], О.Я. Олійник [76, 77], А.Я. Аюкаєв [5], А.М. Тугай [101], П.О. Грабовський [18, 23], В.Л. Поляков [87, 93], А.М. Фоміних [104, 106], М.Г. Журба [38], С.М. Епоян [34], Н.Е. Hudson [136], D.A. Cornwel [130], A.K. Deb [132], K.J. Ives [140], J. Kozeny [146] та ін.

Першим описав процес фільтрації рідини, насиченої завислими твердими частинками, в пористому середовищі С.В. Ізбаш [40]. За ним А.Н. Патрашев [81], розглядаючи напірний ламінарний рух такої рідини, визначив критерії, які характеризують взємозв'язок між основними характеристиками фільтраційного потоку і домішками, що транспортуються. Далі Т. Iwasaki [144] припустив, що при складанні рівнянь кінетики видалення забруднень, зміна концентрації твердої речовини в потоці за шляхом руху відбувається пропорційно величині цієї концентрації. Одночасно, Б.В. Дерягін [32] і в подальшому В.П. Криштул [53] показали, що основною причиною, яка впливає на процес осадження і прилипання завислих твердих частинок, що переносяться фільтраційним потоком, є сорбція цих частинок на поверхні як часток завантаження, так і частинок забруднень, які осіли раніше.

Таким чином, процес фільтрування в загальному випадку представляють як рух рідини із частинками забруднень через пористе середовище [125, 129, 145]. При цьому частина цих забруднень затримується на поверхні часток завантаження в певному об'ємі фільтра, а друга частина продовжує транспортуватись водою в нижні шари споруди. Маса забруднень затриманих в певному шарі фільтра за одиницю часу дорівнює їх масі, видаленій з води цим шаром зернистого середовища за той же час. Тобто, відбувається перехід маси забруднень із рухомого завислого стану в прикріплений нерухомий стан [152]. Даний процес математично описується одновимірним нестационарним рівнянням балансу забруднень (масопереносу) у вигляді [11]

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = D_l \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1.6)$$

де  $n$  – пористість фільтруючого шару;  $C$  – масова концентрація зависі у воді,  $\text{г/м}^3$ ;  $V$  – швидкість фільтрування,  $\text{м/год}$ ;  $S$  – концентрація прикріпленого осаду в завантаженні,  $\text{г/м}^3$ ;  $D_l$  – коефіцієнт дифузії,  $\text{м}^2/\text{год}$ .

Фізичний зміст рівняння (1.6) є наступним: кількість речовини, що накопичена шаром завантаження товщиною  $\Delta x$  за одиницю часу  $\Delta t$ , тобто  $\frac{\partial S}{\partial t}$ , дорівнює кількості речовини, яка вилучається з води за одиницю часу  $V \frac{\partial C}{\partial x}$ . Член в правій частині – дифузійна складова. Більшість авторів [11, 17, 58, 65, 78, 91, 114] нехтують як першим членом рівняння, так і дифузійною складовою в зв'язку з їх малим значенням порівняно з іншими членами.

Інтенсивність процесу видалення забруднень із рідини в пористому зернистому завантаженні в загальному випадку математично описується рівнянням лінійної або нелінійної кінетики процесу. Аналіз результатів досліджень роботи фільтрувальних очисних споруд показав, що в основному при описанні кінетики видалення забруднень з води, що очищається, практично всі автори використовували два підходи. У відповідності з першим із них, зменшення концентрації забруднень у воді за висотою фільтруючого матеріалу за напрямком руху води і в часі відбувається тільки за рахунок ефекту прилипання частинок забруднень до часток завантаження і до частинок забруднень, які прилипли раніше. Причому, інтенсивність прилипання залежить від багатьох факторів, в тому числі від швидкості фільтрування, характеристик фільтруючого зернистого завантаження і фізико-хімічних властивостей частинок забруднень, що видаляються. Рівняння, яке описує даний процес, може бути представлено у вигляді

$$\frac{\partial S}{\partial t} = ACf(S), \quad (1.7)$$

де  $A$  – коефіцієнт, який враховує властивості пористого середовища і суспензії, а також ефект їх взаємодії при осадженні зависів.

Згідно з другим підходом на ефективність роботи фільтра і ступінь очистки води, що оброблюється, одночасно впливають два процеси: інтенсивність прилипання частинок забруднень і їх зрив у потік, що рухається, під впливом фільтраційного потоку. В цьому випадку інтенсивність першого і другого процесів змінні з часом і за висотою фільтра. Відповідне рівняння буде

$$\frac{\partial S}{\partial t} = A_1 C - A_2 S, \quad (1.8)$$

тут  $A_1$  і  $A_2$  – коефіцієнти, які характеризують ефект осадження і відриву прилиплених частинок забруднень.

Прикладом першого підходу до математичного описання кінетики видалення забруднень може служити робота К. Ives [143], в якій зміну концентрації забруднень за товщиною фільтра прийнято у вигляді:

$$-\frac{\partial C}{\partial x} = \alpha(S)C, \quad (1.9)$$

де  $\alpha(S) = \left( \alpha_0 + cS - a_c \frac{S^2}{n_0 - S} \right) C$ ;  $C$  – об'ємна концентрація осаду;  $S = S(x, t)$  –

питомий об'єм осаду, тобто об'єм затриманої фільтром речовини, віднесений до одиниці об'єму завантаження фільтра;  $\alpha_0(S)$  – початкове значення коефіцієнту прилипання (для чистого піску);  $c$  і  $a_c$  – постійні параметри;  $n_0$  – початкова пористість завантаження.

Другий член виразу в дужках враховує поступову зміну концентрації зависі в фільтраті, яка спостерігається зазвичай на початку процесу, особливо у дослідах з шарами завантаження невеликої товщини. Третій член визначає зменшення  $\alpha(S)$  по мірі накопичення відкладень в завантаженні фільтра, що на думку автора пов'язано зі спрямлінням ліній течії і збільшенням істинної швидкості руху рідини в порах. Зміну концентрації забруднень у фільтрі з часом автор пропонує розраховувати за залежністю

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\alpha t}. \quad (1.10)$$

В основі фізичної моделі, запропонованої К. Ives [140, 142], прийнято, що осад не вимивається повністю по всій висоті завантаження, так як при накопиченні осаду зростає істинна швидкість, і частинки забруднень проскакують перш ніж можуть прилипнути. Але ця модель суперечить досліду.

Таким чином теорія К. Ives не враховує основного фізичного явища процесу фільтрування – нерівномірного накопичення осаду за висотою завантаження, що викликано зміною його структури і напрямку руху води, яка фільтрується.

Однотипні залежності отримали і інші дослідники, наприклад:

- Літвініцин [141]

$$\frac{\partial n}{n} = (1 - e^{\alpha t}), \quad (1.11)$$

- Н.В. Оводов [72]

$$\frac{c}{c_0} = e^{\frac{-\alpha x_1}{e^t + \beta_1}}, \quad (1.12)$$

- Ю.М. Шехтман [114]

$$\frac{c}{c_0} = \frac{e^{NC_0 t}}{e^{NC_0 t} + e^{NBx} - 1}, \quad (1.13)$$

де  $n$  – пористість завантаження;  $\partial n$  – питомий об'єм осаду;  $t$  – тривалість фільтрування;  $\alpha$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $N$ ,  $B$  – емпіричні коефіцієнти.

Автори приймають, що швидкість накопичення осаду пропорційна об'ємній концентрації суспензії і обернено пропорційна істинній швидкості фільтрування потоку ( $u$ ):

$$\frac{\partial S}{\partial t} = N_1 \frac{C^*}{u}. \quad (1.14)$$

При цьому вважається, що фізичну картину явищ, які протікають при фільтрації суспензії, відображає наступне рівняння:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = NC^* (1 - S), \quad (1.15)$$

де  $C^* = C^*(x, t)$  – об’ємна концентрація суспензії;  $S = S(x, t)$  – насиченість порового простору осадженою масою або об’єм осадженої маси в рихлому тілі в одиниці об’єму порового простору.

Т. Iwasaki вважав [144], що фільтрування води через зернисте завантаження являє собою динамічний процес, який залежить від висоти завантаження і часу фільтрування. При цьому затримання частинок залежить в товщі завантаження відбувається пропорційно їх концентрації у воді, що фільтрується. Постійна цієї пропорційності зростає паралельно збільшенню ступеня закупорки пор завантаження залежними частинками і тривалості фільтрування. На основі експериментальних досліджень ним було отримано залежність коефіцієнта проникнення залежить  $\lambda_i$  в товщу завантаження від насиченості порового простору  $S$  і товщини фільтруючого шару  $x$ :

$$\lambda_i = l / (x - x_1) \lg e \cdot \lg(S / S_1). \quad (1.16)$$

У 1968 р. американський учений А. Deb [132] опублікував результати досліджень, в яких було зроблено спробу поетапного розвитку теорії фільтрування через піщаний фільтр. Застосувавши рівняння руху рідини і теорію розмірностей, а також використавши результати своїх експериментальних досліджень, він запропонував уточненні рівняння процесу прояснення. Так залежність модифікованого коефіцієнта фільтрації  $\lambda_m$  від пористості завантаження  $n_0$ , ступеня насичення її осадом  $S$ , товщини завантаження  $x$ , швидкості фільтрування  $V$  представлена у вигляді

$$\lambda_m = B \left( \frac{x}{n - S} \right)^A, \quad (1.17)$$

де  $A$  і  $B$  – дослідні коефіцієнти.

В моделі S. Mohanka [150] величину модифікованого коефіцієнта фільтрації запропоновано знаходити за залежністю

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \left( 1 + k \frac{S}{n_0} \right)^x \left( 1 - \frac{S}{n} \right)^y \left( 1 - \frac{S}{S_{np}} \right)^z. \quad (1.18)$$

Зміну концентрації затриманого осаду А. Adin і М. Rebhun [120, 154] представили у вигляді

$$\frac{\partial S}{\partial t} = k_1 v C (S_{np} - S) - k_2 S I. \quad (1.19)$$

В представлених залежностях  $n_0, n_s$  – пористість чистого та замуленого завантаження;  $\lambda_0, \lambda$  – початковий і тимчасовий коефіцієнти фільтрації;  $I$  – гідравлічний похил;  $a, \beta, k, x, y, z$  – емпіричні коефіцієнти.

Е.В. Венеціанов [11] розглядає двокомпонентну модель фільтрування, тобто він вважає, що осад знаходиться в двох зонах – активній і пасивній, для кожної з яких записуються окремо два рівняння кінетики. Для активних зон швидкість відриву вважається пропорційною концентрації осаду. Для обох форм осаду прийняті лінійні рівняння кінетики:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = \alpha \left( C - \frac{\rho_a}{\Gamma_a} \right), \quad \Gamma_a = \frac{\rho_{ao}}{C_0}, \quad (1.20)$$

де  $\rho_a$  – повна ємність фільтра;  $\rho_{ao}$  – ємність активної зони (концентрація осаду, що вимивається);  $C_0$  – початкова концентрація суспензії, яка надходить на фільтр;  $\Gamma_a$  – стала.

Кінетика утворення форми осаду, що не вимивається, описується рівнянням

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} = \alpha_n (\rho_n) C. \quad (1.21)$$

Зміна  $a_n$  пов'язана з ефектом ущільнення (старіння) осаду.

Для встановлення взаємозв'язку між ступенем затримання зависі в завантаженні і зростанням гідравлічного опору в ньому Е.В. Венеціанов, Р.Н. Рубінштейн і М.М. Сенявін запропонували використовувати методи динамічної сорбції [12]. При цьому рівняння кінетики фільтрування ними розглядалось як окремий випадок системи рівнянь динаміки сорбції (однокомпонентна задача, лінійна ізотерма, зовнішньодифузійна кінетика). Для випадку нелінійної ізотерми рівняння кінетики процесу фільтрування має вигляд

$$\frac{\partial C_{oc}}{\partial t} = \alpha(C_0 - C_n), \quad (1.22)$$

де  $C_{oc}$  – концентрація осаду в порах завантаження;  $C_0$  – концентрація зависі на вході в фільтр;  $C_n$  – концентрація частинок на поверхні зерна;  $\alpha$  – коефіцієнт прилипання зависі.

Автори робіт [61, 148], вказуючи на переважаючу роль адгезії частинок зависі до зерен завантаження в процесі фільтрування, пояснюють її взаємодією сил Ван-дер-Ваальса і електростатичних сил відштовхування.

В. Мацкрле [60] виразив процес фільтрування зкоагульованих суспензій критеріальним рівнянням, яке враховує рівняння адгезії, рівняння протікання рідини, рівняння нерозривності і граничні умови за об'ємом і за часом

$$f(m_a, H_0, Fr, Eu, Re) = 0. \quad (1.23)$$

При напірному усталеному ізотермічному русі води критеріальне рівняння (1.23) спрощується:  $Fr \rightarrow 0$ ,  $H_0 \rightarrow 0$ ,  $Eu = f(Re)$ , тоді

$$m_a = f(Re), \quad (1.24)$$

де  $m_a$  – критерій подібності Мацкрле, який виражає диференційне рівняння адгезії

$$m_a = \frac{At^* d}{v_r^* \Delta r^2 m_{y\partial}^t}. \quad (1.25)$$

У рівнянні (1.25)  $A$  – постійна Ван-дер Ваальса;  $t^*$  – характеристичний час, необхідний для прилипання частинок на поверхні завантаження з певної відстані;  $v_r^*$  – седиментаційна швидкість осадження частинок зависі в гравітаційному полі;  $\Delta r$  – товщина просторової адгезії для зернистого завантаження;  $m_{y\partial}^t$  – питома маса зависі;  $d$  – діаметр зерна завантаження.

На основі експериментальних досліджень процесу фільтрування суспензії автором була отримана формула критеріального рівняння

$$m_a = 43,1 Re^{1,135}, \quad (1.26)$$

з якого можна знайти коефіцієнт прилипання  $\alpha$ , а потім і концентрацію зависі на виході з фільтруючого шару визначеної довжини

$$C_k = \beta C_0^\alpha. \quad (1.27)$$

При цьому автор замінює безперервний процес адгезії ступінчастим, складаючи окремі ступені при розгляді всієї товщини завантаження.

Аналізуючи основні теоретичні положення В. Мацкрле, неважко побачити, що в них знехтувано гравітаційними та інерційними силами, які грають вагому роль в закріпленні і переносі частинок зависі в товщі завантаження. Такі явища, як адгезія до раніше прилиплого шару, відрив раніше прилиплих частинок до зерен і перенос їх в нижче розташовані шари за рахунок гідродинаміки фільтраційного потоку, можуть призвести до великих розбіжностей між теоретично обчисленими і практичними значеннями основних розрахункових параметрів при застосуванні даних теоретичних концепцій в конкретних умовах. Окрім названих явищ також приділяється увага впливу на процес фільтрування води через зернисті завантаження електрокінетичних явищ [13, 73, 126, 139]. Проте, в них приведені розрізнені, нерідко суперечливі відомості, які дозволяють аналізувати і узагальнювати лише деякі експериментальні дані процесів фільтрування.

Як показав проведений нами аналіз, дані по визначенню величин коефіцієнтів прилипання частинок забруднень до часток завантаження  $\alpha$  і їх відриву  $\beta$  від останніх у вітчизняній і закордонній спеціальній літературі представлені досить обмежено. Окремі дослідження з цього питання часто носять суперечливий характер [134, 135]. Цю обставину можна пояснити неможливістю безпосереднього визначення даних параметрів із дослідів тобто складністю процесу в цілому.

З нашої точки зору цікава інформація з розглядуваного питання представлена в роботі [149]. Згідно з отриманими даними величина коефіцієнта  $\alpha$  вважається комплексною і визначається трьома складовими



параметрами: броунівською дифузією ( $\alpha_B$ ), силами ван дер Ваальса ( $\alpha_i$ ) та гравітаційним ефектом або ефектом осідання ( $\alpha_G$ )

$$\alpha = \alpha_B + \alpha_i + \alpha_G. \quad (1.28)$$

Величину коефіцієнта  $\alpha$  в загальному випадку пропонується розраховувати за формулою

$$\alpha = \frac{3}{2} \cdot \frac{1-n}{d_e} \cdot \frac{V}{n} \eta \gamma, \quad (1.29)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт ефективності роботи колектора, який залежить від умов роботи і визначається за залежністю

$$\eta = \eta_B + \eta_i + \eta_G. \quad (1.30)$$

При переважанні броунівської дифузії (частинки забруднень менше

кількох мікрон)  $\eta_B = 4A^{\frac{1}{3}} \cdot N_{Pe}^{-\frac{2}{3}}$ ; при переважанні сил ван дер Ваальса

$\eta_i = 0,72A \cdot N_{Lo}^{\frac{1}{8}} \cdot N_R^{\frac{15}{8}}$ ; при переважанні гравітаційних сил

$\eta_G = 0,0024A \cdot N_G^{1,2} \cdot N_R^{-0,4}$ , де  $A = \frac{1 - (1-n)^{\frac{5}{3}}}{1 - 1,5(1-n)^{\frac{1}{3}} + 1,5(1-n)^{\frac{5}{3}} - (1-n)^2}$ ,  $N_R = \frac{d_q}{d_e}$ ,

$N_{Pe} = \frac{d_q V}{D_{BM}}$  – критерій Пекле,  $N_{Lo} = \frac{4H}{9\mu d_q^2 V}$  – число Льюїса,

$N_G = \frac{g d_q^2 (\rho_q - \rho_e)}{18\mu V}$  – відношення гідравлічної крупності частинки забруднень

до швидкості фільтрування,  $n$  – пористість матеріалу завантаження,  $d_e$ ,  $d_q$  – еквівалентний діаметр зерна (колектора) і частинки забруднень,  $V$  – швидкість фільтрування,  $\gamma$  – ефективність зіткнень, яка приймається 0,000086...0,059 [137],  $H$  – константа Гамакера,  $\mu$  – динамічна в'язкість рідини,  $D_{BM}$  – коефіцієнт броунівської дифузії.

У випадку коли частинки забруднень і часток завантаження мають протилежний заряд (негативний заряд зерен завантаження і позитивний заряд

частинок забруднень) величину коефіцієнта прилипання  $\alpha$  пропонується знаходити із співвідношення [124]:

$$\alpha = \lambda V_p, \quad (1.31)$$

де  $V_p$  – середня швидкість руху колоїдів, яка розраховувалась за формулою

$$V_p = \frac{q}{h} \left[ 2 - \left( 1 - \frac{r_p}{r_0} \right)^2 \right], \quad r_0 = (1,1969n - 0,1557)r_c, \quad r_c - \text{середній радіус пор.}$$

Вважається, що параметр  $\lambda$  корелює з  $d_e$ , а значить з гідравлічною провідністю ґрунту. Для слабопроникних матеріалів (глини та ін.), що складаються з дрібних частинок, які мають велике значення відношення площі поверхні до об'єму, цей ефект не залежить від інших раніше досліджуваних ефектів: властивості розчинів (іонна сила, рН), колоїдів (розмір, форма, поверхневий заряд), склад зерен-колекторів. Стверджується, що співвідношення (1.29) справедливе фракції піску: від 106 нм до 250 нм і розмірі частинок забруднень до 0,45 нм.

В роботі [153] при визначенні величини коефіцієнтів прилипання  $\alpha$  і відриву  $\beta$  використовується поняття одиночного колектора (зерна завантаження). При цьому враховується та обставина, що за рахунок відкладення частинок забруднень, розміри колектора і інші його характеристики змінюються з часом. Вважається, що інтенсивність осідання частинок забруднень пропорційна доступній вільній поверхні колектора, а інтенсивність видалення частинок, які попередньо відклались, – пропорційна зайнятій площі.

Дійсна пористість фільтруючого завантаження  $f$  визначається з використанням числа частинок  $N_p$  і пористості осаду  $f_d$  з рівняння:

$$1 - f = N_c \frac{\pi d_c^3}{6} + \frac{N_p \frac{\pi}{6} d_p^3}{1 - f_d}. \quad (1.32)$$

Мінімально дозволена (лімітуюча) пористість  $f_u$  при цьому розраховується виходячи з граничного об'ємного питомого осаду  $\delta_u$ :

$$f_u = f_0 - \frac{\delta_u}{1 - f_d}, \quad (1.33)$$

де  $f_0$  – початкова пористість матеріалу завантаження.

За даними роботи [138] коефіцієнт адсорбції частинок забруднень частками завантаження пропонується розраховувати за залежністю:

$$\alpha = D_\infty f_1 \left( \frac{h_m}{r_p} \right) \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi k_B T}} \exp\left( -\frac{\Phi_m - \Phi_1}{k_B T} \right), \quad (1.34)$$

де  $D_\infty = \frac{k_B T}{6\pi\mu r_p}$ , універсальний гідродинамічний фактор Бреннера,

$$f_1 \left( \frac{h}{r_p} \right) = \frac{h}{r_p} \left/ \left( 1 + \frac{h}{r_p} \right) \right., \quad \gamma = -\frac{d^2\Phi}{dh^2}, \quad h = h_m, \quad \Phi(h) = \Phi_B(h) + \Phi_A(h) + \Phi_R(h), \quad \Phi_B(h) -$$

близькодійний потенціал відштовхування Борна;  $\Phi_A(h)$  – потенціал притягання Ван-дер-Ваальса з урахуванням ефекту запізнювання;  $\Phi_R(h)$  – потенціал взаємодії подвійного електричного шару.

Коефіцієнт десорбції визначається за формулою:

$$\beta = \frac{D_\infty f_1(h_m/r_p)}{\delta} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi k_B T}} \exp\left( -\frac{\Phi(h_m) - \Phi(h_1)}{k_B T} \right). \quad (1.35)$$

В роботі [38] М.Г. Журба, на основі аналізу даних багатьох авторів, вказує на приблизні границі дії різних механізмів доставки і закріплення частинок забруднень в тілі фільтра в залежності від їх розмірів. Так, при розмірах частинок зависі 0,15-100 мкм і зерен завантаження з діаметром 0,3-2,5 мм підвищується роль броунівського руху, при діаметрі частинок зависі 0,1-0,05 мкм – молекулярних сил, сил тяжіння і адсорбції, для частинок розміром 0,1-1 мкм – сил осідання і Ван-дер-Ваальса. При розмірі частинок 1-25 мкм на інтенсивність видалення забруднень в основному впливають сили осідання, інерції і випадкового контакту, для частинок діаметром більше 25-50 мкм – сили механічного перехоплення. Відмічається, що теоретичний розрахунок траєкторії руху частинок забруднень в пористому середовищі на

сьогодні ускладнений, завдяки наявності у рідині, що фільтрується, полідисперсних зависів і складності структури зернистого шару.

Детальний аналіз математичних моделей, які характеризують кінетику прояснення води в фільтрувальних спорудах, що запропоновані в останній час, приведено в роботі [111]. Спроби різних авторів зв'язати в єдині комплекси параметри, які характеризують фізико-механічні властивості фільтруючого завантаження, води, що очищається, і накопиченого осаду, представлена в [6]. При цьому всі автори вважали, що осад має монодисперсний характер, завантаження фільтрів однорідне за складом, а швидкість фільтрування і фізико-хімічний склад води протягом фільтроциклу не змінюється, що суттєво обмежує область їх застосування.

Найбільше визнання і розповсюдження у вітчизняній практиці очистки води фільтруванням знайшла теорія Д.М Мінца [65], яка отримала широке експериментальне підтвердження і була доведена до практичного використання. Вона відноситься до моделей другого типу. У відповідності з нею процес фільтрування на швидких фільтрах має фізико-хімічну природу, а ефект прояснення води передбачає налипання завислих часток до зерен піску і до раніше налиплих частинок під дією молекулярних сил, зокрема сил Ван-дер-Ваальса і сили тяжіння. При цьому ефект прояснення води кожним елементарним шаром завантаження слід розглядати як сумарний результат двох протилежних процесів: процесу вилучення частинок з води шляхом закріплення на зернах завантаження під дією сил прилипання і процесу відриву раніше прилиплих частинок і зворотного надходження їх у воду під впливом гідродинамічних сил потоку. Рівняння балансу речовини (1.6) при цьому має вигляд

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (1.36)$$

де  $S$  – щільність насичення завантаження осадом, тобто маса осаду, який накопичився на даний момент часу в одиниці об'єму завантаження,  $\text{г/м}^3$ ;

$t$  – тривалість процесу фільтрування, год;  $V$  – швидкість фільтрування, м/год;  $C$  – концентрація зависі у воді, г/м<sup>3</sup>;  $x$  – вертикальна координата, м.

У рівняння (1.36) входять дві незалежні змінні величини  $C$  та  $S$ . Другим рівнянням, яке описує специфіку процесу, його фізичну картину, прийнято рівняння типу (1.8). Воно відображає кінетику процесу прояснення суспензій при фільтруванні. Форма цього рівняння визначається фізико-хімічними властивостями завантаження і суспензії. В практиці фільтрування переважно використовується рівняння лінійної кінетики, що в першу чергу, пояснюється його зручністю при застосуванні аналітичних методів досліджень. Традиційно воно має вигляд [21, 131, 155]

$$-\frac{\partial C}{\partial x} = \alpha C - \frac{\beta}{V} S, \quad (1.37)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт швидкості прилипання частинок зависі до поверхні зерен фільтруючого завантаження, м<sup>-1</sup> [74];  $\beta$  – коефіцієнт швидкості відриву раніше прилиплих частинок зависі, с<sup>-1</sup> [62].

Разом з тим відмічено, що сорбційна властивість фільтруючого матеріалу часто змінюється з часом (зазвичай зменшується). Врахувати це явище вдається завдяки використанню більш складних рівнянь нелінійної кінетики [95, 157, 158]. Найбільше розповсюдження серед них в теоретичних і експериментальних дослідженнях отримало рівняння

$$-\frac{\partial C}{\partial x} = \alpha_n (S_m - S)C - \frac{\beta}{V} S, \quad (1.38)$$

де  $\alpha_n$  – приведений коефіцієнт швидкості прилипання зависі;  $S_m$  – брудомісткість (максимальна маса осаду, яка може відкластися в порах одиниці об'єму зернистого завантаження).

Рівняння (1.37, 1.38) відображають специфіку процесу фільтрування суспензії через зернисті фільтри. Градієнт концентрації  $\frac{\partial C}{\partial x}$  перш за все залежить від концентрації суспензії, яка надходить до кожного елементарного шару фільтруючого завантаження  $\Delta x$ , і інтенсивності прилипання частинок

забруднень до зерен завантаження. Ця залежність відображається першим членом правої частини рівняння.

Мінц Д.М. з рівняння матеріального балансу (1.37) отримав диференціальне рівняння процесу прояснення малоконцентрованих суспензій при фільтруванні суспензії через шар зернистої засипки у вигляді

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x \partial t} + bV \frac{\partial C}{\partial x} + a \frac{\partial C}{\partial t} = 0, \quad (1.39)$$

де  $C$  – концентрація зависі у воді;  $x$  – товщина засипки;  $a$  і  $b$  – параметри фільтрування.

Диференціальне рівняння (1.39) є рівнянням телеграфного типу. При прийнятті ефектів прилипання і відриву частинок забруднень постійними в процесі фільтрування, воно має розв'язок у вигляді нескінченного ряду [65]. Однак, використання цього розв'язку в практичних розрахунках очисних споруд ускладнено. В зв'язку з цим автором досліджень для реального проектування розроблена методика технологічного моделювання процесу фільтрування, за якою, при відомих якісних характеристиках води з довільного джерела, можна аргументовано визначати параметри завантаження фільтрувальних споруд.

Обробка великої кількості експериментальних даних у випадку лінійної кінетики дозволила автору для визначення параметрів  $a$  і  $b$  використати залежності типу

$$\alpha = \alpha_v V^{\varepsilon_1} d^{\lambda_1} \quad b = \beta_v V^{\varepsilon_2} d^{\lambda_2}, \quad (1.40)$$

де  $\alpha_v$  і  $\beta_v$  – розмірні коефіцієнти, які враховують сукупний вплив фізичних і фізико-хімічних властивостей води і суспензії;  $V$  – швидкість фільтрування;  $d$  – діаметр зерен засипки фільтруючого завантаження;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \lambda_1, \lambda_2$  – показники степені.

З'ясувалось, що при різноманітному складі води, що фільтрується, і в широкому діапазоні зміни швидкості фільтрування та розміру зерен

завантаження показники степені залишаються практично постійними і рівними:  $\varepsilon_1 = -0,7$ ;  $\varepsilon_2 = 1,0$ ;  $\lambda_1 = -1,7$ ;  $\lambda_2 = -1,0$ .

З урахуванням цього, вираз (1.40) можна записати

$$\alpha = \alpha_V V^{-0,7} d^{-1,7}, \quad b = \beta_V V d^{-1,0}, \quad (1.41)$$

Коефіцієнти  $\alpha_V$  і  $\beta_V$  знаходять за результатами попередніх експериментальних досліджень, після побудови допоміжних графіків.

Основними недоліками розглянутої моделі фільтрування слід вважати те, що вона не враховує нерівномірність накопичення осаду за висотою завантаження, що викликана зміною його структури за напрямком потоку води, що фільтрується. Окрім того, дана модель рекомендується для застосування при постійних витраті і швидкості фільтрування. Все це свідчить про досить умовний характер математичної моделі і ускладнює її використання в інженерних розрахунках.

Інший підхід при розробці математичної моделі процесу фільтрування запропоновано Д.М. Фоміних [111]. Ним було прийнято, що частинка забруднень, яка осіла на завантаженні, знаходиться в стані спокою. Рівняння рівноваги для цього випадку автор представляє у вигляді [105]:

$$in\rho g = \omega\tau, \quad (1.42)$$

де  $i$  – гідравлічний похил;  $n$  – пористість завантаження;  $\rho$  – густина води;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $\omega$  – питома поверхня зерен;  $\tau$  – дотичне напруження на поверхні зерен.

Прирівнюючи величину дотичних напружень  $\tau$  до міцності на зсув структурованого осаду  $\sigma$  в граничному стані

$$\tau_{zp} = \sigma_{zp}, \quad (1.43)$$

отримаємо математичну модель, яка характеризує рівновагу структурованого осаду в завантаженні, що дозволяє моделювати процес і розраховувати фільтри на оптимальний режим роботи. Дана модель відрізняється від розглянутих раніше тим, що вона не залежить від кінетичних особливостей процесу. Як відмічено в [112], складність математичного опису процесу

прояснення води фільтруванням полягає у визначенні області і границь моделювання.

На даний час розроблена лише оцінка статичних характеристик міцності осаду. Методика визначення кінетичних змін міцності осаду ще не створена. В даному випадку багатofакторний процес кінетики масопереносу в фільтрах замінено простим процесом рівноваги структурованого осаду, де складний процес його формування характеризується одним інтегральним фактором  $\sigma$ . Застосовуючи відомі формули для визначення  $i$  і  $\omega$ , з рівняння (1.42) автором отримано критерій подібності

$$B = \frac{30,66V\alpha_{\phi}\mu}{\tau_{ep}d}, \quad (1.44)$$

де  $V$  – швидкість фільтрування;  $\alpha_{\phi}$  – коефіцієнт форми зерен;  $\mu$  – динамічна в'язкість води;  $\tau_{ep}$  – міцність осаду на зсув;  $d$  – діаметр зерен.

Критерій  $B$  дозволяє однозначно визначити  $m_{ep}$  за параметрами технологічного моделювання, а відповідно, і тривалість фільтроциклу для будь-яких значень  $V$ ,  $\alpha_{\phi}$ ,  $\mu$ ,  $\tau_{ep}$ ,  $d$  в області автотельного режиму роботи фільтрів.

Автором стверджується, що при роботі фільтра в безреагентному режимі, коли в завантаженні не утворюється структурований осад через відсутність автотельності, а також при змінній з часом швидкості фільтрування, проводити технологічне моделювання і здійснювати розрахунок фільтрів за методикою, яка запропонована Д.М. Мінцем, некоректно.

В практиці проектування і експлуатації швидких фільтрів важливе місце займає випадок їх роботи із швидкістю фільтрування, що зменшується з часом [7, 16, 25, 26, 69, 71, 76, 121, 122, 127]. Дане питання також було розглянуто Н.В. Ярошевською і Л.А. Кульським в роботах [117, 118]. При аналітичному описанні процесу прояснення води, для даного випадку авторами використані загальновідомі вихідні рівняння масопереносу і кінетики процесу. Прийнято



умову, що швидкість фільтрування з часом змінюється миттєво і стрибкоподібно. В розрахунках розглядаються середні для даного проміжку часу значення швидкості, що не відповідає реальній картині фільтрування. В результаті роботи залежності для визначення характеру зміни концентрації за висотою фільтра носять досить складний характер. Крім того, розрахунок параметрів фільтрів пропонується проводити з використанням ЕОМ методом наближень.

Корисними для практики експлуатації фільтрувальних споруд із швидкістю, що зменшується в часі, з нашої точки зору, є роботи виконані під керівництвом П.А. Грабовського [18, 19, 21]. Запропонована авторами модель процесу прояснення також базується на відомих рівняннях балансу і кінетики (1.36), (1.37). Окрім цього, для повноти описання явища, додатково були використані залежності, за якими визначались: втрати напору, гідравлічний похил, величина пористості завантаження, баланс води в споруді, витрата води, рівень води в фільтрі, кінематичні коефіцієнти. В цілому отримана математична модель, що описує розглядуваний процес включала систему з 10 диференціальних, інтегральних і алгебраїчних рівнянь, які містять 10 невідомих. Аргументовано визначені відповідні граничні умови. Розв'язання отриманої системи рівнянь автори здійснюють чисельними методами для різних варіантів роботи фільтрувальних споруд. При реалізації даної математичної моделі використана пошарово-почасова методика. За допомогою даної методики виконано чисельне дослідження характеристик роботи фільтрів. В цілому результати задовільно співпали з існуючими експериментальними даними.

До недоліків розглядуваної роботи слід віднести ту обставину, що в ній не запропоновано узагальнюючих аналітичних розв'язків моделі. Крім цього, при розробці вихідної моделі були прийняті певні припущення: однорідність завантаження і затриманих зависів за висотою фільтра; явище “старіння” осаду з часом; постійність пористості завантаження у фільтрі за об'ємом в початковий період після кожної промивки.

Значну увагу аналітичним методам розв'язання системи вихідних рівнянь, які описують особливості роботи швидких фільтрів, приділено В.Л. Поляковим [84, 89, 93]. На основі отриманих розв'язків автором запропоновані достатньо обґрунтовані і прості у використанні розрахункові залежності для визначення основних технологічних характеристик розглядуваних споруд. Наводяться приклади конкретних розрахунків. Кінцеві результати представлені у вигляді аналітичних залежностей і графіків. Слід відмітити, що дані методики не в повній мірі підкріплені реальними практичними даними і потребують для свого завершення проведення додаткових експериментальних досліджень.

#### **1.4. Диференційні рівняння руху рідини в пористому зернистому середовищі**

Для математичного описання процесу очистки води зернистим завантаженням швидких фільтрів, окрім рівнянь, які описують масоперенос (1.36) і кінетику процесу видалення забруднень (1.37), необхідно додатково мати рівняння, що відображають гідродинаміку потоку в пористому середовищі. Гідродинамічний блок звичайно повинен включати рівняння для визначення втрат напору в зернистому шарі, рівняння нерозривності і відповідні граничні умови.

Дослідженням гідравлічного опору зернистого шару при протіканні через нього рідини присвячено велику кількість робіт [11, 36, 38, 65, 115]. Відомо, що втрати напору при фільтрації залежать від багатьох факторів, а саме: товщини завантаження; діаметру і форми зерен; пористості; швидкості руху і в'язкості води; товщини відкладень на зернах; фізико-хімічних властивостей матеріалу забруднень; об'єму раніше затриманого осаду і т.д. [88, 123, 128].

У 1856 р. Дарсі на основі своїх дослідів встановив і сформулював закон названий його іменем: швидкість фільтрації  $V$  прямо пропорційна гідравлічному похилу

$$V = k_{\phi} \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{або} \quad V = k_{\phi} I, \quad (1.45)$$

де  $k_{\phi}$  – коефіцієнт фільтрації завантаження, який визначається дослідним шляхом;  $h$  – напір фільтраційного потоку;  $z$  – висота (товщина) шару завантаження;  $I$  – гідравлічний похил.

Рівняння нерозривності (постійності витрати за товщиною завантаження) звичайно представляють у вигляді

$$\frac{\partial V}{\partial z} = 0. \quad (1.46)$$

Пізніше були спроби отримати вираз закону Дарсі шляхом осереднення рівнянь Нав'є–Стокса для руху рідини в системі порових каналів. Це виявилось можливим тільки для випадку спрощених уявлень про геометрію пористого середовища, коли пористий простір представляли у вигляді системи паралельних капілярів рівного діаметра (“ідеальний ґрунт”).

Проведені дослідження показали, що рівняння Дарсі у формі (1.45) можна вважати справедливим тільки для випадку лінійного закону фільтрації, тобто, при ламінарному і безінерційному русі рідини в поровому просторі. При переході до турбулентного режиму руху характер залежності суттєво змінюється. Для цього випадку звичайно використовують узагальнений закон Дарсі у вигляді [38]

$$-\frac{\partial h}{\partial z} = AV + BV^2, \quad (1.47)$$

де  $A$  і  $B$  – коефіцієнти пропорційності, що залежать від структури шару і, в першу чергу, від його пористості та питомої поверхні.

Очевидно, що рівняння (1.47) може застосовуватись при зміні швидкості в широких межах. При малих швидкостях коефіцієнт  $A$  дорівнює зворотній величині коефіцієнта фільтрації і другим доданком нехтують. У випадку

значних швидкостей, при турбулентному характері руху, нехтують першим членом.

Як відомо з курсу гідравліки, критерієм застосування закону Дарсі зазвичай слугує число Рейнольдса ( $Re$ ), яке являє собою безрозмірну комбінацію фізичних величин. Для фільтрації воно може бути представлено у вигляді

$$Re = \frac{ul}{\nu}, \quad (1.48)$$

де  $u$  – швидкість руху води в порах ( $u = \frac{V}{n}$ );  $l$  – характерний лінійний розмір;  $\nu$  – кінематична в'язкість рідини, що фільтрується;  $V$  – швидкість фільтрації;  $n$  – пористість зернистого завантаження фільтра.

Іноді за характерний лінійний розмір приймають еквівалентний діаметр зерен завантаження ( $d_{ек}$ ). В практиці фільтраційних розрахунків найбільше розповсюдження знайшов показник – гідравлічний радіус, який представляє собою відношення об'єму пор до площі їх бічної поверхні. З урахуванням цього число Рейнольдса буде

$$Re = \frac{Vd_{ек}}{6\nu(1-n)}, \quad (1.49)$$

коефіцієнт опору при цьому складе

$$\psi = \frac{5,1\alpha_{\phi}^2}{Re}. \quad (1.50)$$

Іноді число Рейнольдса виражають через іншу зручну характеристику – коефіцієнт проникності  $k_n$  [116]

$$Re = \frac{10V\sqrt{k_n}}{n^{2,3}\nu}. \quad (1.51)$$

При цьому коефіцієнт проникності  $k_n$  розраховується за залежністю

$$k_n = \frac{k_{\phi}\nu}{g}. \quad (1.52)$$

Коефіцієнт проникності завантаження  $k_n$  не залежить від властивостей рідини, а характеризує властивість пористого середовища в тій чи іншій степені пропускати крізь себе рідини і газу. Проникність зернистого середовища при лінійному режимі фільтрації визначається наближеною формулою [111]

$$k_n(t) = k_{n0}(1 - \delta^n)^3, \quad (1.53)$$

де  $k_n(t)$ ,  $k_{n0}$  – проникність завантаження у довільний та початковий моменти часу;  $\delta = \Delta m / m_0$  – відносний об'єм затриманої маси забруднень;  $n_0$  пористість чистого завантаження;  $n$  – показник степені (для некоагульованої суспензії  $n = 0,5$  [65], для коагульованої  $n = 1$  [114]). За дослідженнями різних авторів критичне число Рейнольдса ( $Re_{кр}$ ) знаходиться в межах: за Н.Н. Павловським [80] – 7-9; Н.В. Щелкачевим [116] – 4-12 та ін.

За даними Д.М. Мінца [65] завдяки тому, що в пористому середовищі відбувається безупинне перемішування струменів, зміна їхнього напрямку і швидкості, важко встановити чітку границю для критичних чисел Рейнольдса. Автор пропонує це робити з урахуванням визначеного ступеня точності ( $\theta$ ), тоді

$$Re = \frac{A}{B} \cdot \frac{\theta}{1 - \theta}, \quad (1.54)$$

де  $A$  – параметр, що залежить від форми зерна;  $B$  – параметр, що залежить від поруватості і форми зерна.

Проведені автором розрахунки показали, що критичне число Рейнольдса мало залежить від матеріалу зерен і у більшій мірі визначається точністю розрахунків. При відносній похибці до 15%  $Re_{кр} = 4.1$ , що відповідає швидкості фільтрування 15 м/год, діаметру зерен завантаження 1 мм, температурі води 20°C.

Як слідує із закону Дарсі (1.45), важливе значення при розрахунку характеристик фільтраційного потоку має правильне визначення величини коефіцієнта фільтрації середовища для різних типів завантаження фільтрів.

При його знаходженні для незакальматованого (чистого) фільтру найбільш повно розроблені рекомендації для піщано-гравійних фільтрів. Майже всі запропоновані в різний час формули для визначення  $k_{\phi 0}$  можна звести до загального вигляду [47]

$$k_{\phi 0} = \frac{g}{\mu} d_{ек}^2 f(n_0, \eta), \quad (1.55)$$

де  $f(n_0, \eta)$  – деяка функція, яка залежить від властивостей матеріалу завантаження фільтра.

Нижче наведено окремі відомі формули низки авторів, отримані напівемпіричним і емпіричним шляхом:

- формула Хазена [3]

$$k_{\phi 0} = c \tau d_{10}^2, \quad (1.56)$$

де  $c$  – коефіцієнт, що залежить від ступеня засмічення піску глиняними частинками, причому для чистих пісків  $c = 700 \dots 1000$ , для забруднених  $c = 500 \dots 700$ ;  $d_{10}$  – ефективний чи діючий діаметр зерен завантаження;  $\tau$  – температурний коефіцієнт, що дорівнює  $\tau = 0,7 + 0,03T$ ;  $T$  – температура води.

Дана формула рекомендована для пісків, що мають  $0,1 < d_{10} < 3$  мм і коефіцієнт неоднорідності  $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}} \leq 5$ .

- Формула Е.А. Замарина

$$k_{\phi 0} = 7,94 \frac{n_0^3}{(1 - n_0)^2} c_1 \tau d_e^2, \quad (1.57)$$

тут  $d_e$  – ефективний діаметр зерен;  $c_1$  – коефіцієнт, що залежить від пористості завантаження;  $\tau$  – температурний коефіцієнт.

- Формула Козені-Кармана, яка отримала широке розповсюдження при підборі розміру зерен завантаження фільтра [14]

$$k_{\phi 0} = \frac{0,0055}{\nu} g \left( \frac{d}{a_{\phi}} \right) \frac{n_0^3}{(1 - n_0)^2}, \quad (1.58)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість рідини;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $n_0$  – пористість ґрунту;  $d$  – середній діаметр частинок ґрунту;  $a_{\phi}$  – коефіцієнт їх форми.

- Формула М. Павчича [41]

$$k_{\phi 0} = \frac{3,99\varphi_1}{\nu} \sqrt{\eta} \frac{n_0^3}{(1 - n_0)^2} d_{17}^2, \quad (1.59)$$

де  $\varphi_1$  – коефіцієнт форми завантаження ( $\varphi_1 = 1,0$  для піщано-гравійного ґрунту,  $\varphi_1 = 0,35 \dots 0,40$  для щебневих ґрунтів);  $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$  – коефіцієнт неоднорідності;

$d_{60}$ ,  $d_{17}$ ,  $d_{10}$  – характерні діаметри часток (визначаються за кривою гранулометричного складу).

- формула Д.М. Мінца [65, 66] (для ламінарного режиму)

$$k_{\phi 0} = 5,35 \frac{d_{ек}^2 n_0^3}{a_{\phi}^2 \mu (1 - n_0)^2}, \quad (1.60)$$

де  $\mu$  – динамічна в'язкість рідини.

У випадку використання завантаження із полімерних матеріалів діаметром  $d_{сер} > 1,7$  мм в роботі [45], як приклад, коефіцієнт фільтрації запропоновано розраховувати за емпіричною формулою

$$k_{\phi 0} = 200(d_{сер} - 1,62), \quad (1.61)$$

в якій, на відміну від наведених вище формул, значення  $k_{\phi 0}$  залежить тільки від середнього діаметра гранул  $d_{сер}$ .

При фільтруванні суспензії порові канали накопичують забруднення, забиваються, їх опір збільшується. При постійній швидкості фільтрування величина коефіцієнта фільтрації зменшується, а втрати напору зростають. У випадку коли відомі значення коефіцієнтів фільтрації на початку роботи фільтра ( $k_{\phi 0}$ ) і в довільний момент роботи ( $k_{\phi}$ ) насиченість порового простору

затриманими частинками забруднень можна визначати за залежністю Д.М. Мінца [64]

$$\alpha = 1 - \sqrt[3]{\frac{\kappa_{\phi}}{\kappa_{\phi 0}}}. \quad (1.62)$$

На практиці зміну величини коефіцієнта фільтрації в зв'язку із складністю задачі аналітично визначити не є можливим. Всі використовувані розрахункові залежності носять емпіричний характер. Тому на практиці зазвичай всі фільтраційні розрахунки здійснюють через величину гідравлічного похилу, який знаходять із співвідношення

$$I = \frac{h}{L}, \quad (1.63)$$

де  $h$  – втрати напору в шарі завантаження товщиною  $L$ .

При цьому в загальному випадку втрати напору в шарі фільтруючого завантаження визначають за залежністю

$$h = \int_0^L I dz. \quad (1.64)$$

Для розрахунку гідравлічного похилу при русі води в чистому завантаженні запропоновано велику кількість емпіричних залежностей, наприклад

$$I = 5,2 \cdot 10^{-3} \mu V \frac{\omega_0}{n_0^3}, \quad (1.65)$$

де  $\omega_0$  – сумарна поверхня стінок порових каналів в одиниці об'єму шару.

За даними Д.М. Мінца [65] даний параметр в зернистому шарі рекомендується знаходити за одночленною формулою

$$I = \frac{\Delta P}{L} = \rho_e V \frac{0,188 a_{\phi}^2 v (1 - n_0)^2}{d_{ек}^2 n_0^3 g}, \quad (1.66)$$

де  $L$  – висота фільтруючого завантаження, см;  $\rho_e$  – густина води, г/см<sup>3</sup>.

Область застосування цієї формули обмежена не надто великими числами Рейнольдса. Проте, при фільтруванні зі змінною швидкістю в початкові періоди роботи швидкості руху рідини високі. Тому доцільно



використовувати двочленні формули з більш широким діапазоном застосування. Однією з найбільш розповсюджених таких формул є двочленна формула Ергана [4]:

$$I = \frac{h}{L} = 150 \frac{(1-n_0)^2 V \nu}{n^3 d^2 g} + 1,75 \frac{(1-n) V^2}{n^3 d g} . \quad (1.67)$$

У випадку, коли розглядається варіант визначення змінних характеристик фільтруючого завантаження в процесі роботи фільтра, на основі існуючих дослідних даних отримані співвідношення між параметрами чистого фільтра і фільтра після певного часу його роботи.

Відношення гідравлічних похилів:

$$\frac{I}{I_0} = \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \left( \frac{n_0}{n} \right)^3 , \quad (1.68)$$

де  $I, n, \omega$  – відповідно, гідравлічний похил, пористість, питома поверхня зерен завантаження в довільний момент часу;  $I_0, n_0, \omega_0$  – відповідно, гідравлічний похил, пористість, питома поверхня в початковий момент часу.

Д.М. Мінц вважає, що з достатнім ступенем точності в розрахунках можна приймати

$$\frac{\omega}{\omega_0} = 1, \quad (1.69)$$

тоді

$$I = I_0 \left( \frac{n_0}{n} \right)^3 . \quad (1.70)$$

Позначимо об'єм осаду, який накопичився в одиниці об'єму завантаження, через  $\Delta n$ . Ця величина називається питомим об'ємом осаду.

При цьому пористість в даний момент часу буде

$$n = n_0 - \Delta n . \quad (1.71)$$

З урахуванням цього, формула (1.60) буде мати вигляд

$$I = I_0 \left( \frac{n_0}{n_0 - \Delta n} \right)^3 . \quad (1.72)$$

Узагальнюючи результати багатьох експериментальних досліджень, залежність (1.72) представляють у вигляді напівемпіричної залежності виду [95]

$$I = I_0 \left( \frac{1}{1 - \delta^{n_1}} \right)^{n_2}, \quad (1.73)$$

де  $\delta = \frac{\Delta n}{n_0}$  – насиченість порового простору.

Величини показників степені  $n_1$  і  $n_2$  за даними ряду авторів прийняті постійними. Так за Д.М. Мінцем [65]  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 3$ ; за Ю.М. Шехтманом [114]  $n_1 = 0,5$ ,  $n_2 = 3$ ; за Мацкрле [60]  $n_1 = 1,2$ ,  $n_2 = 2$ ; за Айзоном [38]  $n_1 = n_2 = 1$ . Детальний аналіз формул типу (1.65) здійснено В.З. Мельцером в роботі [63]. При інженерних розрахунках, з нашої точки зору, для  $\delta \leq 0,3$  перевагу слід надавати рекомендаціям Ю.М. Шехтмана, а при  $\delta \geq 0,5$  – рекомендаціям М.Д. Мінца. Подальші дослідження показали, що в загальному випадку значення коефіцієнтів  $n_1$  і  $n_2$  можуть змінюватись як за висотою завантаження, так і з часом.

Вираз (1.73) встановлює зв'язок між гідравлічним похилом у перерізі замуленого завантаження, початковим гідравлічним похилом, початковою пористістю завантаження і питомим об'ємом осаду. Він показує, що при однакових початковій пористості завантаження і питомому об'ємі осаду, гідравлічний похил в перерізі замуленого завантаження прямо пропорційний початковому гідравлічному ухилу.

Знаючи гідравлічний похил в довільний момент роботи фільтра ( $I$ ) і товщину завантаження ( $L$ ), легко визначити втрати напору, які при цьому мають місце

$$\Delta h = IL. \quad (1.74)$$

## 1.5. Визначення розрахункових режимів роботи фільтра

Для роботи фільтра при постійній з часом швидкістю (витратою) фільтрування зазвичай повинно забезпечуватись виконання двох основних умов: необхідна якість очистки води і безперебійна робота фільтра в період до досягнення в ньому граничних втрат напору.

Час, протягом якого завантаження фільтра здатне забезпечувати прояснення води до заданої степені очистки, називають часом захисної дії  $t_p$ , який за методикою Д.М. Мінца [65] розраховується за формулою

$$t_p = \frac{1}{K'} \left( \frac{x}{V^{1,7} d_{ек}^{0,7}} - \frac{X'_0 d_{ек}}{V} \right), \quad (1.75)$$

або

$$t_p = \frac{1}{K} \frac{b}{a} \left( x - \frac{X_0}{b} \right). \quad (1.76)$$

Час, протягом якого забезпечується робота фільтра до досягнення на ньому граничних втрат напору визначається за виразом

$$t_n = \frac{H_{zp} - H_0}{H_0 f(\delta_{zp})} \cdot \frac{b}{a} x. \quad (1.77)$$

У наведених рівняннях (1.75) – (1.77) прийнято:  $x$  – товщина шару завантаження, см;  $d_{ек}$  – еквівалентний діаметр зерен завантаження, мм;  $V$  – швидкість фільтрування, м/год;  $H_{zp}$  і  $H_0$  – граничні і початкові втрати напору, см;  $K'$ ,  $X'_0$  – дослідні параметри;  $K$ ,  $X_0$  – константи, величина яких залежить тільки від ефекту очистки води (їх значення табульовані);  $a$  і  $b$  – параметри фільтрування, які визначаються експериментально;  $f(\delta_{zp})$  – функція, яка залежить тільки від величини граничної насиченості порового простору відкладеннями ( $\delta_{zp} = \frac{\Delta n_{zp}}{n_0}$ ). За даними М.Д. Мінца [121] її пропонується

знаходити за емпіричною залежністю

$$f(\delta_{zp}) = 0,15 \left[ \frac{1}{(1 - \delta_{zp})^3} - 1 \right]. \quad (1.78)$$

Слід зазначити, що рівняння (1.75) – (1.77) справедливі для стійкої (автомодельної) області роботи фільтрів, в якій зміна швидкості фільтрування, товщини шару завантаження і розмір зерен не впливають або впливають несуттєво на концентрацію зависі в прояснюваній воді.

Залежності (1.75) або (1.76) слід використовувати при розрахунку неоднорідного за гранулометричним складом, але однорідного за видом матеріалу фільтруючого завантаження, коли параметри процесу фільтрування визначаються еквівалентним діаметром зерен фільтруючого середовища. Рівняння (1.77) враховує фактори, від яких залежить приріст втрат напору. Вплив швидкості фільтрування, розміру зерен завантаження, властивостей суспензії, що фільтрується, і осаду визначається параметрами  $a$ ,  $b$  і  $\delta_{zp}$ , а також величиною початкової втрати напору  $H_0$ , яка в свою чергу залежить від температури води і структурних характеристик пористого середовища – пористості і форми зерен завантаження.

Інший метод визначення часу захисної дії запропоновано Р.І. Аюкаєвим [6]. Для розрахунку  $t_p$  необхідно спочатку побудувати графічні залежності  $x = f(h_i / h \cdot 100\%)$  і  $h_i / h = f(C / C_0)$ , потім з графіка  $t_p = f(x)$  знайти значення  $x_0$  і величину швидкості просування концентрації зависі шаром завантаження  $\bar{n}$  як тангенс кута нахилу прямої на графіку  $x - t_p$ . Визначивши  $x_0$  і  $\bar{n}$ , знаходять тривалість фільтроциклу за залежністю:

$$t_p = x_0 \bar{n}^{-1}. \quad (1.79)$$

А.М. Фоміних для характеристики часу роботи фільтра використовує термін – тривалість фільтроциклу  $t_\phi$ . Згідно з його рекомендаціями [103], тривалість фільтроциклу  $t_\phi$  з однорідним завантаженням визначається за формулою

$$t_\phi = \Delta n_{zp} x C_3 / V(C_0 - C_\phi), \quad (1.80)$$

а концентрація зависі у воді в дослідному фільтрі  $C_3$

$$C_3 = \Gamma / \Delta n_{zp} x, \quad (1.81)$$

де  $\Gamma$  – брудомісткість завантаження, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta n_{zp}$  - граничне накопичення осаду в порах завантаження.

При інших значеннях  $V$  і  $d_{ек}$  брудомісткість завантаження рекомендується перераховувати за формулою

$$\Gamma = \Gamma^* (\Delta n_{zp} / \Delta n_{zp}^*) (d^* / d), \quad (1.82)$$

де символи, відмічені надрядковим індексом, відносяться до дослідних умов.

Проте виконати такий перерахунок і співставити з наявними даними інших авторів без проведення нових експериментів складно, так як для розрахунку  $\Delta n_{zp}$  при нових значеннях  $V$  і  $d$  необхідне експериментальне визначення  $i_{zp}$  або  $\tau_{zp}$  в ідентичних умовах отримання даних іншими авторами.

Метод розрахунку  $t_{\phi}$  за методикою А.М. Фоміних рекомендується застосовувати тільки для випадку реагентної очистки малоконцентрованих суспензій для питних цілей.

Запропонований Д.М. Мінцем розрахунок  $t_{\phi}$  за  $t_p$  або  $t_n$  може застосовуватись як для реагентних, так і для безреагентних методів фільтрування природних і доочистки стічних вод. В порівнянні з ним методи розрахунку інших авторів рекомендовані лише для випадків строгого реагентного фільтрування малоконцентрованих суспензій [65], а спрощений метод розрахунку за [64] передбачає до того ж обов'язкове дотримання синфазності зростання втрат напору і кінетики зміни концентрації зависі у воді на виході з елементарних шарів завантаження.

В залежності від конкретних значень величин, які входять у рівняння (1.75) – (1.77), співвідношення між тривалістю захисної дії фільтра і часом досягнення граничних втрат напору, можуть бути різними, а саме:

$$t_p > t_n; \quad t_p < t_n; \quad t_p = t_n. \quad (1.83)$$

Коли  $t_p > t_n$  фільтр вимикають на промивку в зв'язку з тим, що подальший приріст втрат напору неможливий, так як наявний напір, обумовлений висотним розташуванням споруд, витрачається на подолання

опору завантаження. При цьому затримуюча здатність матеріалу використовується неповністю.

У випадку  $t_p < t_n$  фільтр вимикають на промивку при початку погіршення якості фільтрату. Наявний напір при цьому використовується неповністю, так як втрати напору в завантаженні не досягли свого граничного значення.

Нарешті, при  $t_p = t_n$  моменти досягнення граничних втрат напору і початку погіршення якості фільтрату співпадають. Даний варіант вважається оптимальним з техніко-економічної точки зору.

Тим не менш, з точки зору санітарної надійності, доцільно приймати  $t_p/t_n > 1$ , так як при цьому протягом усього циклу гарантується висока якість фільтрату і підвищується ступінь надійності роботи фільтра. Тому необхідно виходити з певного, заздалегідь заданого відношення часу захисної дії завантаження до часу, протягом якого досягаються граничні втрати напору, яке забезпечує достатню санітарну надійність і економічність роботи фільтрів. Режим роботи фільтрів, при якому забезпечується задане відношення, може бути названий оптимальним. Стосовно величини цього відношення, то воно зазвичай приймається:  $t_p/t_n = 1,2-1,5$ .

Таким чином, тривалість фільтроциклу залежить від гранулометричного складу та товщини засипки, швидкості фільтрування, якісних показників вихідної води та ступеня її очистки, інтенсивності накопичення забруднень в поровому просторі, властивостей матеріалу самого завантаження [27, 92].

В той же час в роботі [111] А.М. Фоміних піддає критиці умову оптимальності режиму фільтрування при виконанні умови  $t_p = t_n$ . Автор вважає, що в цьому випадку поняття граничного напору ототожнюється з поняттям наявного напору, що не є однозначним. Наявний напір – величина постійна, яка визначається висотним розташуванням фільтрів і довільно призначається ДСТУ – 3-3,5 м вод. ст. Граничний напір – величина змінна, яка характеризує завершення фільтроциклу і залежить при інших рівних умовах від температури води і значень  $x, V, a, \mu, \tau_{zp}, d$  [107-110].

Аналізуючи результати проведених досліджень можна стверджувати, що загальний вигляд функціональної залежності, яка описує ефективність роботи зернистого фільтра, можна представити у вигляді:

$$C = \Phi(x, V, C_0, t_1, d, B, T, \Gamma, Z), \quad (1.84)$$

$$\text{або } h = \Phi_2(x, V, C_0, t_2, d, B, T, \Gamma, Z), \quad (1.85)$$

де  $C, h$  – відповідно концентрація зависі і втрати напору;  $t_1 = t_p$ ;  $t_2 = t_n$ ;  $B, T, \Gamma, Z$  – фактори, які враховують фізико-хімічні властивості води, що фільтрується, зависі  $B$ , технологічну схему фільтрування  $T$ , зміну геометрії порового простору фільтруючого шару через накопичення в ньому осаду  $\Gamma$ , фізико-хімічні властивості поверхні гранул завантаження  $Z$ .

Через певний проміжок часу від початку фільтрування фактори  $\Gamma$  і  $Z$  починають змінюватись в результаті безперервної зміни в процесі фільтрування насиченості порового простору  $\delta$  і пористості завантаження  $n$ . Якщо строго підходити до зміни факторів в функціях (1.82) і (1.83) протягом фільтроциклу, то лише параметри  $x, d$  і  $T$  можуть вважатися постійними. При цьому вимірними безпосередньо при роботі фільтра можуть бути тільки параметри  $C_0, t, d, x, V, C_\phi$ . З урахуванням цього ці функції приймуть вигляд [37]:

$$C_\phi = f_1(x, V, C_0, t_p, d), \quad (1.86)$$

$$\text{і } h_t = f_2(x, V, C_0, t_n, d, C_\phi). \quad (1.87)$$

Вирішуючи цю задачу з урахуванням теорії розмірностей, отримано критеріальні комплекси і розрахункові формули для визначення тривалості фільтроциклу за  $t_p$  і  $t_n$

$$t_p = \frac{1}{V} \left( \frac{C_0 x^{\alpha_1} d^{\beta_1}}{C_\phi} k_p \right)^{\frac{1}{\alpha_1 + \beta_1}}, \quad (1.88)$$

$$t_n = \frac{1}{V} \left( \frac{C_0 x^{\alpha_2} d^{\beta_2} h^{\gamma_2}}{C_\phi} k_n \right)^{\frac{1}{\alpha_2 + \beta_2 + \gamma_2}}, \quad (1.89)$$

де  $k_p$ ,  $k_n$  – узагальнені коефіцієнти роботи фільтра у випадках досягнення закінчення фільтроциклу за проскоком зависі в фільтрат або досягнення граничних втрат напору.

Формули (1.88), (1.89) можуть бути використані для розрахунку будь-яких зернистих фільтрів, які працюють на водах різної якості як у безреагентному, так і в реагентному режимах за різноманітними технологічними схемами.

Представлений матеріал по визначенню часу роботи фільтра підтверджує той факт, що на практиці отримати надійні результати розрахунку можна тільки провівши попередні експериментальні дослідження.

## 1.6. Висновки по розділу 1

На основі здійсненого в розділі 1 аналізу теоретичних і експериментальних досліджень роботи швидких фільтрів, які працюють з постійною і змінною в часі швидкістю фільтрування, можна зробити такі основні висновки.

1. В практиці очистки води швидкі фільтри із зернистим завантаженням знаходять широке застосування. Найбільше розповсюдження дістали фільтри із завантаженням з кварцового піску. В останній час в якості фільтруючого елементу активно застосовуються різні природні матеріали: антрацит, керамзит, аглопорит, шлакова пемза, погорілі породи, вулканічні шлаки, базальтові, мармурові і керамічні піски та завантаження із полімерних матеріалів.

2. Математичний апарат для описання процесу руху і прояснення рідини у завантаженні при постійній швидкості фільтрування розроблений досить повно. Для випадку роботи фільтра зі змінною швидкістю відповідні математичні моделі ще потребують суттєвого ґрунтовного вдосконалення.

3. Існуючі інженерні методики розрахунку фільтрувальних споруд, що працюють з постійною швидкістю, носять відносно спрощений характер і



недостатньо враховують окремі важливі змінні в часі характеристики. Методика ж аналітичного розрахунку фільтрів, які працюють зі змінною швидкістю, вимагає доопрацювання.

4. У спеціальній технічній літературі представлено великий об'єм експериментальних даних по визначенню характеристик фільтрувальних споруд, які працюють з постійною швидкістю руху води. Експериментальні дані для випадку роботи даних споруд зі змінною швидкістю фільтрування у вітчизняних і закордонних літературних джерелах відображені недостатньо.

5. Експериментальний матеріал для визначення коефіцієнтів прилипання і відриву частинок забруднень від зернистого завантаження досить обмежений і містить багато протиріч.

6. Умови довготривалості роботи фільтра, тобто аргументованого визначення часу фільтроцикла, при змінній швидкості фільтрування потребують додаткового дослідження і обґрунтування.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИСТКИ ВОДИ НА ФІЛЬТРАХ З ЗЕРНИСТОЮ ЗАСИПКОЮ

#### 2.1. Загальні положення

Аналіз літературних джерел, в яких розглядаються особливості роботи швидких фільтрів, а також умови експлуатації реальних очисних споруд показує, що в процесі фільтрування рідини через зернисте завантаження можна виділити ряд спільних ознак і важливих характеристик.

З самого початку чергового фільтроциклу над поверхнею завантаження з'являється рівень води, який згодом протягом всього періоду фільтрування поступово, причому нерівномірно в часі, піднімається. Внаслідок цього напір на вході в завантаження відповідним чином зростає, відповідно збільшується дійсна швидкість руху води у міжпоровому просторі. Подібне стає можливим внаслідок прогресуючого замулення фільтруючого матеріалу, що призводить до зменшення середньої для всього фільтра швидкості фільтрування. Аналіз роботи реальних споруд дає підстави для виділення двох початкових стадій в технологічному процесі освітлення, які передують третій – основній. Завдяки короткочасності цих перших стадій в завантаженні встигає утворитися лише мінімальна кількість осаду, тому його зміною і накопиченням у вказаний період звичайно нехтують. Враховуючи ці обставини в розглядуваному випадку виправдано можемо обмежитися розглядом виключно гідравлічних аспектів дії фільтра.

В період першої стадії фільтрування над зернистим завантаженням відбувається формування поверхневого шару сирі води, а також переміщення вниз по завантаженню фронту насичення, який розділяє його на ділянки з заповненими і незаповненими водою порами [83]. Протягом другої стадії має місце швидкий підйом утвореного рівня води, що відбувається внаслідок недостатньої пропускної здатності поки ще замуленого пористого

середовища. Подача води на фільтр здійснюється з постійною витратою. При цьому приймається низхідний напрям фільтраційного потоку, хоча в розглядуваному діапазоні швидкостей фільтрування  $V$  його вибір не має принципового значення.

Далі настає третя основна стадія роботи фільтра. Саме під час неї безпосередньо відбувається видалення з води частинок забруднень, які затримуються зернистим завантаженням. Схема роботи швидкого фільтра наведена на рис. 2.1.

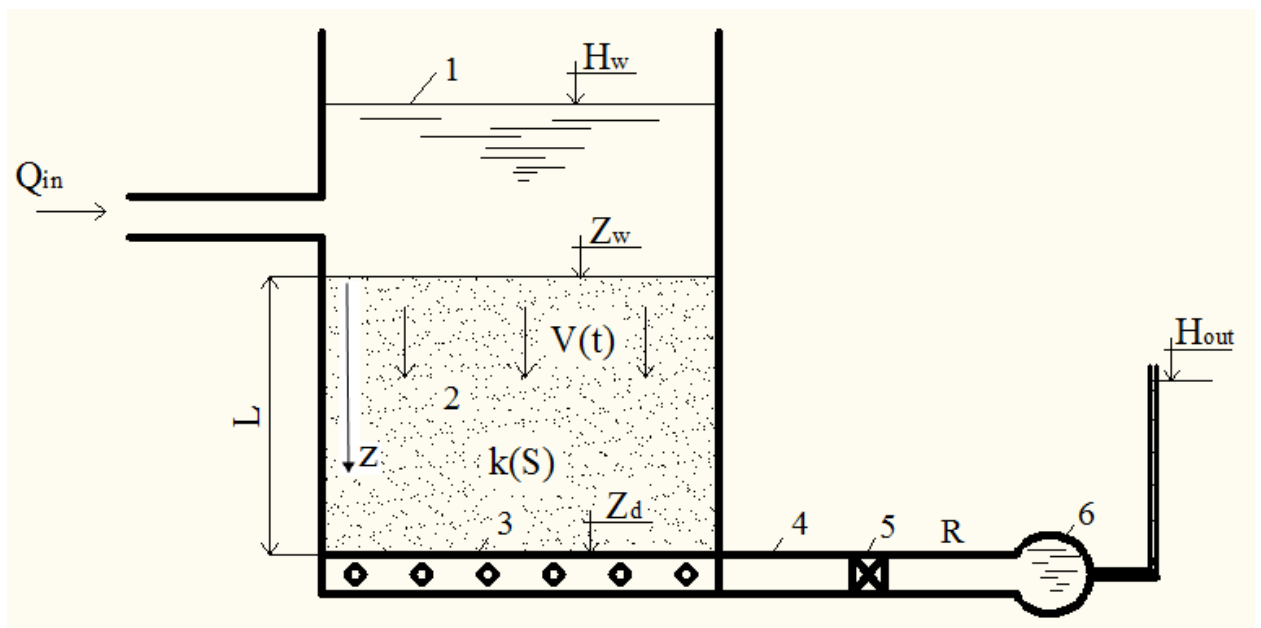


Рис. 2.1. Схема роботи швидкого фільтра:

1 – рівень води над фільтром; 2 – завантаження фільтра; 3 – збірний трубопровід; 4 – трубопроводи; 5 – засувка; 6 – відвідний трубопровід

На представленій схемі  $Q_{in}$  – постійна витрата сирі води, яка подається на очистку;  $V(t)$  – змінна з часом швидкість фільтрування;  $L$  – висота (товщина) фільтруючого зернистого завантаження;  $z$  – змінна поточна глибина розташування розглядуваного перерізу;  $k(S)$  – змінна з часом і за висотою завантаження величина коефіцієнта фільтрації;  $R$  – опір відвідних трубопроводів;  $H_{out}$  – напір у відвідних трубопроводах.

Нижче приведено детальний аналіз всіх стадій роботи швидкого фільтра протягом фільтроциклу.

## 2.2. Математична модель очистки і руху води на фільтрах з зернистою засипкою

### 2.2.1. Основні характеристики роботи очисного фільтра протягом першої стадії фільтрування

Для зручності викладення матеріалу характеристики, які відносяться до першої стадії фільтрування позначимо індексом “1”. Математична модель, яка сумісно описує на даній стадії динаміку рівня води над завантаженням та безпосередньо в ньому, буде мати вигляд:

$$\omega \frac{dH_{w1}}{dt} = Q_{in} - \omega V_1(t); \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial^2 h_1}{\partial z^2} = 0; \quad (2.2)$$

$$t = 0, H_{w1} = Z_w; \quad (2.3)$$

$$z = Z_w, h_1 = H_{w1}; \quad z = Z_f, h_1 = Z_f, \quad (2.4)$$

де  $H_{w1}$ ,  $Z_w$ ,  $Z_f$  – відмітки рівня води над завантаженням, поверхні завантаження та фронту насичення (рис. 2.1);  $\omega$  – площа поверхні завантаження;  $Q_{in}$  – витрата води, що подається на фільтр;  $V_1$ ,  $h_1$  – швидкість фільтрування та п’езометричний напір на першій стадії.

В моделі (2.1) – (2.4) не приймаються до уваги капілярні сили, які діють на фронті насичення [102, 133, 151], що є виправданим внаслідок короткочасності даної стадії та високої проникності пористого середовища. Глибина промоченої зони завантаження швидко збільшується, причому відмітка  $Z_f$  є невідомою функцією від часу.

Розв’язок рівняння (2.2) при граничних умовах (2.4) дає такі вирази для напору  $h_1$  і швидкості  $V_1$ :

$$h_1(z, t) = H_{w1}(t) + \frac{H_{w1}(t) - Z_f(t)}{Z_w - Z_f(t)}(z - Z_w), \quad (2.5)$$

$$V_1(t) = k_0 \frac{H_{w1}(t) - Z_f(t)}{Z_w - Z_f(t)}, \quad (2.6)$$

де  $k_0$  – коефіцієнт фільтрації чистого завантаження.

На фронті насичення є справедливою кінематична умова, яка з урахуванням (2.6) буде мати вигляд:

$$-\frac{dZ_f}{dt} = \frac{V_1}{n_0} = \frac{k_0}{n_0} \cdot \frac{H_{w1} - Z_f}{Z_w - Z_f}, \quad (2.7)$$

тут  $n_0$  – пористість чистого завантаження.

До умови (2.7) приєднується трансформоване рівняння (2.1), а саме:

$$\omega \frac{dH_{w1}}{dt} = Q_{in} - k_0 \omega \frac{H_{w1} - Z_f}{Z_w - Z_f}, \quad (2.8)$$

а також початкові умови (2.3) і

$$t = 0, \quad Z_f = Z_w. \quad (2.9)$$

Таким чином має місце система двох рівнянь (2.7), (2.8) відносно двох невідомих величин ( $Z_f$ ,  $H_{w1}$ ). Перш за все з неї слідує зв'язок між вказаними величинами

$$H_{w1} = \frac{Q_{in}}{\omega} t + n_0 Z_f. \quad (2.10)$$

Після підстановки (2.10) в рівняння (2.7) отримуємо:

$$\frac{dZ_f}{dt} - \frac{k_0}{n_0 \omega} \cdot \frac{\omega(1-n_0)(Z_w - Z_f) + Q_{in}t}{Z_w - Z_f} = 0. \quad (2.11)$$

Задачу (2.9), (2.11) задовольняє простий вираз

$$Z_w - Z_f = \lambda t. \quad (2.12)$$

Тоді з (2.11) слідує квадратне рівняння відносно  $\lambda$

$$\lambda^2 - \frac{k_0(1-n_0)}{n_0} \lambda - \frac{k_0 Q_{in}}{n_0 \omega} = 0. \quad (2.13)$$

Фізичний зміст має наступний корінь

$$\lambda = \frac{k_0(1-n_0)}{2n_0} \left( \sqrt{\frac{4n_0 Q_{in}}{k_0 \omega (1-n_0)^2} + 1} + 1 \right). \quad (2.14)$$

З (2.3), (2.8), з урахуванням виразу (2.14), знайдено

$$H_{w1}(t) = Z_w + \left( \frac{Q_{in}}{\omega} - n_0 \lambda \right) t. \quad (2.15)$$

Швидкість  $V_1$ , як витікає з (2.6), (2.12) і (2.15), буде постійною

$$V_1 = \frac{k_0}{\lambda} \left( \frac{Q_{in}}{\omega} + \lambda - n_0 \lambda \right). \quad (2.16)$$

Очевидно, що завантаження повністю промочиться (заповниться сирою водою) до моменту часу

$$t_1 = \frac{Z_w - Z_d}{\lambda}, \quad (2.17)$$

де  $Z_d$  – відмітка основи завантаження.

При цьому рівень води над завантаженням виявиться на відмітці

$$H_{w1}(t_1) = Z_w + \left( \frac{Q_{in}}{\omega} - n_0 \lambda \right) \frac{Z_w - Z_d}{\lambda}. \quad (2.18)$$

Щоб надати розрахунковим залежностям і рівнянням більш загальний вигляд, тут і надалі вводяться безрозмірні змінні й параметри

$$\tilde{H}_{w1} = \frac{H_{w1} - H_{out}}{Z_w - Z_d}, \quad \bar{t} = \frac{k_0 t}{Z_w - Z_d}, \quad \tilde{Z}_w = \frac{Z_w - H_{out}}{Z_w - Z_d}, \quad \bar{Q}_{in} = \frac{Q_{in}}{\omega k_0},$$

так що

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{k_0} = \frac{1-n_0}{2n_0} \left( \sqrt{\frac{4n_0 \bar{Q}_{in}}{(1-n_0)^2} + 1} + 1 \right),$$

де  $H_{out}$  – напір в колекторі фільтрату;  $Z_w - Z_d = L$  – висота завантаження. Тоді відносний час завершення першої стадії буде

$$\bar{t}_1 = \frac{1}{\bar{\lambda}}. \quad (2.19)$$

До цього моменту приведена відмітка  $\tilde{H}_{w1}$  досягає величини

$$\tilde{H}_{w1}(\bar{t}_1) = \tilde{Z}_w + (\bar{Q}_{in} - n_0 \bar{\lambda}) \bar{t}_1. \quad (2.20)$$

### 2.2.2. Основні характеристики роботи очисного фільтра протягом другої стадії фільтрування

Для позначення використаємо індекс “2”, який означає, що відповідна характеристика відноситься до другої стадії. Нехтуючи процесом прояснення суспензії і його впливом на динаміку і баланс рідини в фільтрі, за основу нової моделі візьмемо попередню модель і при цьому додатково врахуємо вплив відвідних комунікацій. В результаті вихідна модель приймає наступний вигляд:

$$\omega \frac{dH_{w2}}{dt} = Q_{in} - \omega V_2(t); \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial^2 h_2}{\partial z^2} = 0; \quad (2.22)$$

$$V_2 = k_0 \frac{\partial h_2}{\partial z}; \quad (2.23)$$

$$H_d(t) = H_{out} + R\omega^2 V_2^2(t); \quad (2.24)$$

$$t = 0, \quad H_{w2} = H_{w1}(t_1) = H_{w2}^0; \quad (2.25)$$

$$z = Z_w, \quad h_2 = H_{w2}; \quad z = Z_d, \quad h_2 = H_d, \quad (2.26)$$

де  $R$  – гідравлічний опір відвідних комунікацій;  $H_d$  – напір в основі завантаження;  $V_2$ ,  $h_2$  – швидкість фільтрування і п’езометричний напір на другій стадії.

В першу чергу знайдемо розподіл напору в завантаженні

$$h_2(z, t) = H_{w2}(t) + \frac{H_{w2}(t) - H_d(t)}{L} (z - Z_w). \quad (2.27)$$

З урахуванням (2.24) з (2.27), отримаємо квадратне рівняння відносно  $V_2$

$$R\omega^2 V_2^2 + \frac{L}{k_0} V_2 - H_{w2} + H_{out} = 0.$$

Таким чином

$$V_2 = \frac{L}{2k_0 R \omega^2} \left( \sqrt{\frac{4k_0^2 \omega^2 R (H_{w2} - H_{out})}{L^2} + 1} - 1 \right). \quad (2.28)$$

Тоді задача відносно відмітки рівня води над завантаженням буде включати рівняння

$$\omega \frac{dH_{w2}}{dt} = Q_{in} - \frac{L}{2k_0 R \omega} \left( \sqrt{\frac{4k_0^2 \omega^2 R (H_{w2} - H_{out})}{L^2} + 1} - 1 \right) \quad (2.29)$$

і умову (2.25). В загальному випадку розв'язок цієї задачі має наступну інтегральну форму

$$t(H_{w2}) = 2k_0 \omega^2 R \mathcal{Y}(H_{w2}), \quad (2.30)$$

$$\text{де } \mathcal{Y}(H_{w2}) = \int_{H_{w2}^0}^{H_{w2}} \frac{d\xi}{2k_0 \omega R Q_{in} + L - \sqrt{4k_0^2 \omega^2 R (\xi - H_{out}) + L^2}}.$$

Після переходу до відносних величин вигляд основної розрахункової залежності (2.30) помітно спрощується і, з урахуванням часу першої стадії, матиме вигляд:

$$\bar{t}(\tilde{H}_{w2}) = 2\bar{R} \mathcal{Y}(\tilde{H}_{w2}) + \bar{t}_1, \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \mathcal{Y}(\tilde{H}_{w2}) = \int_{\tilde{H}_{w2}^0}^{\tilde{H}_{w2}} \frac{d\xi}{2\bar{R}\bar{Q}_{in} + 1 - \sqrt{4\bar{R}\xi + 1}} = \frac{1}{4\bar{R}} & \left[ (2\bar{R}\bar{Q}_{in} + 1) \ln \frac{\tilde{H}_{w2}^0 - \bar{Q}_{in} - \bar{R}\bar{Q}_{in}^2}{\tilde{H}_{w2} - \bar{Q}_{in} - \bar{R}\bar{Q}_{in}^2} + 2\sqrt{4\bar{R}\tilde{H}_{w2}^0 + 1} \right. \\ & \left. - 2\sqrt{4\bar{R}\tilde{H}_{w2} + 1} + (2\bar{R}\bar{Q}_{in} + 1) \ln \frac{(2\bar{R}\bar{Q}_{in} + 1 + \sqrt{4\bar{R}\tilde{H}_{w2} + 1})(2\bar{R}\bar{Q}_{in} + 1 - \sqrt{4\bar{R}\tilde{H}_{w2}^0 + 1})}{(2\bar{R}\bar{Q}_{in} + 1 - \sqrt{4\bar{R}\tilde{H}_{w2} + 1})(2\bar{R}\bar{Q}_{in} + 1 + \sqrt{4\bar{R}\tilde{H}_{w2}^0 + 1})} \right], \end{aligned}$$

$$\bar{R} = \frac{k_0^2 \omega^2}{L} R.$$

З формули (2.31) у двох граничних випадках витікають прості вирази для розшукуваної функції  $\tilde{H}_{w2}(\bar{t})$ . Так, при  $\bar{R} \rightarrow 0$  (мізерно малий опір відвідних комунікацій) легко отримати

$$\tilde{H}_{w2}(\bar{t}) = \bar{Q}_{in} - (\bar{Q}_{in} - \tilde{H}_{w2}^0) e^{-\bar{t}}. \quad (2.32)$$



Якщо ж, навпаки, опір вказаних комунікацій нескінченно великий ( $\bar{R} \rightarrow \infty$ ), то вся вода, що надходить на фільтр, буде акумулюватися над завантаженням і тоді

$$\tilde{H}_{w2}(\bar{t}) = \tilde{H}_{w2}^0 + \bar{Q}_{in} \bar{t}. \quad (2.33)$$

Реальний підйом рівня сирової води у фільтрі відбувається виразно нерівномірно – дуже швидко на першій стадії та на початку другої, а потім різко сповільнюється, асимптотично наближаючись до приведеної відмітки

$$\tilde{H}_m = \tilde{H}_{w2}(\infty) = \bar{Q}_{in} + \bar{R} \bar{Q}_{in}^2. \quad (2.34)$$

Очевидно, що величина  $\tilde{H}_m$  лінійно залежить від  $\bar{R}$  при варіюванні останнього від 0 до  $\infty$ , що узгоджується з (2.32), (2.33).

### 2.2.3. Основні характеристики роботи очисного фільтра протягом третьої стадії фільтрування

Базова математична модель прояснення суспензії фільтруванням зі змінною швидкістю складається з трьох взаємопов'язаних блоків – прояснювального, фільтраційного і гідравлічного [49, 82, 147]. Такий зв'язок пояснюється змінністю та невизначеністю швидкості фільтрування, внаслідок чого ці блоки неможна розв'язувати послідовно. Тим самим значно ускладнюється застосування аналітичних методів. Прояснювальний блок включає наступні рівняння, які широко застосовуються в теорії фільтрування та її додатках – рівняння масопереносу та лінійної кінетики масообміну

$$V(t) \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \alpha(V)C - \beta(V)S, \quad (2.36)$$

які доповнюються граничною та початковою умовами

$$z = 0, C = C_0; \quad t = 0, S = 0, \quad (2.37)$$

де  $C, C_0$  – об’ємні концентрації завислих частинок суспензії в довільному і початковому перерізах;  $S$  – об’ємна концентрація осаджених частинок суспензії;  $\alpha, \beta$  – коефіцієнти швидкостей прилипання завислих та відриву осаджених частинок, які згідно з літературними даними залежать від швидкості фільтрування наступним чином [95]

$$\alpha = \alpha_V V^l, \quad \beta = \beta_V V^q, \quad (2.38)$$

тут  $\alpha_V, \beta_V$  – відповідні постійні приведені коефіцієнти;  $l, q$  – емпіричні константи, які можуть приймати суттєво відмінні значення в залежності від властивостей домішок і механізмів їх доставки до зерен завантаження.

Рівняння з фільтраційного блоку описують, відповідно, рух води в пористому завантаженні, зміну гідравлічного опору його матеріалу та дольовий вміст твердих частинок в осаді, а саме,

$$V(t) = -k(S_S) \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (2.39)$$

$$k = k_0 \left[ 1 - \left( \frac{S_S}{n_0} \right)^{m_1} \right]^{m_2}, \quad (2.40)$$

$$S_S = \gamma(S)S, \quad (2.41)$$

де  $k, k_0$  – поточний і вихідний коефіцієнти фільтрації;  $S_S$  – об’ємна концентрація осаду, який складається з твердих частинок і зв’язаної води;  $h$  – п’езометричний напір;  $n_0$  – пористість чистого завантаження;  $m_1, m_2$  – емпіричні коефіцієнти;  $\gamma(S)$  – емпіричний коефіцієнт, який показує відношення об’ємної концентрації осаду до об’ємної концентрації твердих частинок в ньому.

Третій блок характеризує особливості поведінки непроясної і проясненої води в фільтрувальній установці перед входом в завантаження і після виходу з нього. При цьому враховується, що напір в колекторі фільтрату  $H_{out}$  є постійним, а поверхневий шар починає формуватися одразу ( $t = 0$ ).

Тоді напір на нижній границі завантаження ( $z = L$ ) з урахуванням втрат напору у відповідних комунікаціях буде мати вигляд

$$z = L, \quad h = H_{out} + R\omega^2 V^2, \quad (2.42)$$

де  $R$  – опір відповідних комунікацій;  $\omega$  – площа вхідної поверхні завантаження.

Динаміка рівня вихідної води розраховується на основі рівняння її балансу

$$\omega \frac{dH_w}{dt} = Q_{in}(t) - \omega \cdot V(t), \quad (2.43)$$

при початковій умові

$$t = 0, \quad H_w = H_m, \quad (2.44)$$

тут  $H_w$  – відмітка рівня води над завантаженням;  $H_m$  – його початкова відмітка, яка визначалась при аналізі двох початкових стадій роботи фільтрувальної установки.

Як вже вказувалось, протягом двох початкових стадій фільтрування головним чином і відбувається формування поверхневого шару води. В зв'язку коротким часом їх дії, завантаження до початку третьої стадії фільтрування не встигає суттєво замулитися, що виправдовує застосування однорідної початкової умови (2.37).

Для розв'язання математичної задачі (2.35 – 2.44) попередньо введемо до розгляду нові безрозмірні змінні і параметри:

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \frac{C}{C_0}, \quad \bar{S} = \frac{S}{n_0 C_0}, \quad \bar{z} = \frac{z}{L}, \quad \bar{t} = \frac{V_m t}{n_0 L}, \quad V_m = \frac{Q_{in}}{\omega}, \quad \bar{V} = \frac{V}{V_m}, \quad \bar{\gamma} = \gamma C_0, \quad \bar{k} = \frac{k}{k_0}, \\ \bar{\alpha}_v &= \alpha_v L V_m^{l-1}, \quad \bar{\beta}_v = \beta_v n_0 L V_m^{q-1}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau}{n_0 L}, \quad \psi_V = \frac{Q_{in}}{\omega k_0 n_0}, \quad \tilde{h} = \frac{h - H_{out}}{\Delta h_m}, \quad (2.45) \\ \Delta h_m &= \frac{L Q_{in}}{k_0 \omega}, \quad \tilde{H}_W = \frac{H_W - H_{out}}{\Delta h_m}, \quad \tilde{H}_d = \frac{H_d - H_{out}}{\Delta h_m}, \quad \bar{R} = \frac{k_0 \omega Q_{in}}{L} R. \end{aligned}$$

$$\text{а також} \quad \tau(z, t) = \int_0^t V(\lambda) d\lambda. \quad (2.46)$$

Після підстановки нових безрозмірних змінних у вихідну систему рівнянь, отримаємо:

$$\bar{V}(\bar{t}) \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{S}}{\partial \bar{t}} = 0, \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial \bar{t}} = \bar{\alpha}_V \bar{V}^l(\bar{t}) \bar{C} - \bar{\beta}_V \bar{V}^q(\bar{t}) \bar{S}; \quad (2.48)$$

$$\bar{V} = \bar{k}(\bar{S}) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \bar{z}}, \quad (2.49)$$

$$\bar{k}(\bar{S}) = (1 - \bar{\gamma}^{m_1} \bar{S}^{m_1})^{m_2}; \quad (2.50)$$

$$\psi_V = \frac{d\tilde{H}_W}{d\bar{t}} = 1 - \bar{V}(\bar{t}); \quad (2.51)$$

$$\bar{z} = 0, \bar{C} = 1; \quad \tilde{h} = \tilde{H}_W; \quad \bar{z} = 1, \tilde{h} = \tilde{H}_d + \bar{R} \bar{V}^2; \quad \bar{t} = 0, \bar{S} = 0, \tilde{H}_W = \tilde{H}_m. \quad (2.52)$$

Введемо до розгляду нову змінну:

$$\bar{\tau} = \int_0^{\bar{t}} V(\zeta) d\zeta. \quad (2.53)$$

Тоді рівняння (2.47) – (2.49) трансформуються до вигляду:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{S}}{\partial \bar{\tau}} = 0, \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial \bar{\tau}} = \bar{\alpha}_V \bar{V}^{l-1}(\bar{\tau}) \bar{C} - \bar{\beta}_V \bar{V}^{q-1}(\bar{\tau}) \bar{S}; \quad (2.55)$$

$$\bar{V}(\bar{\tau}) = -\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}, \bar{\tau})) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \bar{z}}. \quad (2.56)$$

Для розв'язку задачі (2.50) – (2.52), (2.54) – (2.56), по-перше, замінимо змінні величини  $\bar{V}^{l-1}(\bar{\tau}), \bar{V}^{q-1}(\bar{\tau})$  їх середніми за розрахунковий період  $[0, T]$  значеннями  $[\bar{V}^{l-1}]_c, [\bar{V}^{q-1}]_c$ . Попередньо було прийнято

$$\bar{V}_c(T) = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{V}(\bar{t}) d\bar{t}. \quad (2.57)$$

Даний параметр можна трактувати як середнє за розрахунковий період гідравлічне навантаження (середню за розрахунковий період відносну швидкість фільтрування).

Також приймаються середні значення величин:

$$[\bar{V}^{l-1}] \cong \bar{V}_c^{l-1}, \quad [\bar{V}^{q-1}] \cong \bar{V}_c^{q-1}. \quad (2.58)$$

Правомірність застосування співвідношень (2.57), (2.58) підтверджується даними про поведінку функції нерегульованої швидкості  $\bar{V}(\bar{t})$  в реальних спорудах. Процедура осереднення  $\bar{V}(\bar{t})$  розповсюджувалась і на коефіцієнти  $\bar{\alpha}(\bar{V})$  і  $\bar{\beta}(\bar{V})$ .

Зважаючи на практично лінійний характер зміни  $\bar{V}$  протягом часу і відносно незначну її зміну протягом фільтроциклу, виправдано функцію  $\bar{V}(\bar{t})$  розкласти в ряд Тейлора в межах точки  $\bar{t} = 0$  і зберегти його перші два члени, тоді

$$\bar{V}(\bar{t}) \cong 1 - \alpha\bar{t}, \quad (2.59)$$

де  $\alpha = -d\bar{V} / d\bar{t}(0) > 0$ .

У відповідності з (2.57) значення  $\bar{V}_c$  в проміжку часу від 0 до  $T$  приблизно буде

$$\bar{V}_c(T) \cong 1 - \frac{\alpha}{2}T. \quad (2.60)$$

Розкладення в ряд Тейлора по  $T$  функції  $\bar{V}_c^\alpha(T)$  з урахуванням (2.59) дає

$$\bar{V}_c^\alpha(T) \cong 1 - \frac{a\alpha}{2}T. \quad (2.61)$$

В результаті аналогічного розкладення по  $\bar{t}$  функції  $\bar{V}^\alpha(\bar{t})$  отримаємо

$$\bar{V}^\alpha(\bar{t}) \cong 1 - a\alpha\bar{t}. \quad (2.62)$$

Осереднення (2.61) за тим же періодом призводить до приблизного виразу

$$[\bar{V}^\alpha(t)]_c \cong 1 - \frac{a\alpha}{2}T. \quad (2.63)$$

Рівність виразів для  $[\bar{V}_c(t)]^\alpha$  і  $[\bar{V}^\alpha(t)]_c$  може служити основою для представлення кінетичного рівняння (2.55) в спрощеній формі

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial \bar{t}} = \bar{\alpha}_V \bar{V}_c^{l-1} \bar{C} - \bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1} \bar{S}. \quad (2.64)$$

Величина  $T$  при розв'язку задачі грає роль параметра і тільки в розрахункових формулах вона ототожнюється з часом  $\bar{t}$ .

Розв'язок рівнянь прояснювального блоку, який включає рівняння (2.47), (2.48), першу і третю умови (2.52), отримано операційним методом. З урахуванням трансформованої третьої умови (2.52)

$$\bar{\tau} = 0, \quad \bar{S} = 0, \quad (2.65)$$

після застосування перетворення Лапласа по змінній  $\bar{\tau}$  отримана система рівнянь відносно відображень  $\bar{C}_L, \bar{S}_L$ , а саме:

$$\frac{\partial \bar{C}_L}{\partial \bar{z}} + p \bar{S}_L = 0, \quad (2.66)$$

$$p \bar{S}_L = \bar{\alpha}_V \bar{V}_c^{l-1} \bar{C}_L - \bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1} \bar{S}_L. \quad (2.67)$$

Звідси знаходимо зв'язок між  $\bar{S}_L$  і  $\bar{C}_L$  в такому вигляді

$$\bar{S}_L(\bar{z}, p) = \frac{\bar{\alpha}_V \bar{V}_c^{l-1}}{p + \bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1}} \bar{C}_L(\bar{z}, p). \quad (2.68)$$

З урахуванням (2.68) рівняння (2.66) відносно величини  $\bar{C}_L$  буде

$$\frac{d\bar{C}_L}{d\bar{z}} + \frac{\bar{\alpha}_V \bar{V}_c^{l-1} p}{p + \bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1}} = 0. \quad (2.69)$$

Розв'язок рівняння (2.69) при трансформованій граничній умові

$$\bar{z} = 0, \quad \bar{C}_L = \frac{1}{p} \quad (2.70)$$

має такий вигляд

$$\bar{C}_L(\bar{z}, p) = \frac{1}{p} \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}_V \bar{V}_c^{l-1} p}{p + \bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1}} \bar{z}\right). \quad (2.71)$$

Тоді з (2.68) слідує, що

$$\bar{S}_L(\bar{z}, p) = \frac{\bar{\alpha}_V \bar{V}_c^{l-1}}{p(p + \bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1})} \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}_V \bar{V}_c^{l-1} p}{p + \bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1}} \bar{z}\right). \quad (2.72)$$

Далі, враховуючи, що

$$\frac{p \pm \bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1}}{p + \bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1}} = 1 - \frac{\bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1}}{p + \bar{\beta}_V \bar{V}_c^{q-1}}, \quad (2.73)$$

вирази (2.71), (2.72), перетворені у відповідності з (2.73), згортаються. В результаті отримано наступні функції-оригінали – безрозмірні концентрації завислих і осаджених частинок дисперсного забруднення

$$\bar{C}(\bar{z}, \bar{\tau}; \bar{V}_c) = e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1} \bar{z}} \left[ e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \bar{\tau}} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2}} \cdot \bar{z} \bar{\tau}) + \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \int_0^{\bar{\tau}} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2}} \bar{z} \eta) d\eta \right], \quad (2.74)$$

$$\bar{S}(\bar{z}, \bar{\tau}; \bar{V}_c) = \bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1} \cdot e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1} \bar{z}} \int_0^{\bar{\tau}} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2}} \bar{z} \eta) d\eta, \quad (2.75)$$

де символ  $I_0$  означає функцію Бесселя уявного аргументу першого роду нульового порядку.

Однак, отримати конкретні значення вказаних концентрацій можна тільки після встановлення зв'язку між відносним параметром  $\bar{V}_c$  і відносним часом  $\bar{t}$ . З цією метою рівняння (2.56) інтегрується із застосуванням другої умови з (2.52) в межах від 0 до довільно вибраного значення відносної координати  $\bar{z}$

$$\tilde{H}_w(\bar{\tau}) - \tilde{h}(\bar{z}, \bar{\tau}) = \bar{V}(\bar{\tau}) \int_0^{\bar{z}} \frac{d\bar{z}}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}, \bar{\tau}; \bar{V}_c))}. \quad (2.76)$$

Використовуючи (2.76) з врахуванням третьої умови з (2.52) нескладно отримати

$$\tilde{H}_w(\bar{\tau}) - \bar{R} \bar{V}^2(\bar{\tau}) = \bar{V}(\bar{\tau}) \int_0^1 \frac{d\bar{z}}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}, \bar{\tau}; \bar{V}_c))}. \quad (2.77)$$

Рівність (2.77) представляє собою квадратне рівняння відносно розшукуваної функції  $\bar{V}(\bar{\tau})$ . Його розв'язок дає такий вираз

$$\bar{V}(\bar{\tau}; \bar{V}_c) = \frac{1}{2\bar{R}} \left( \sqrt{\left( \int_0^1 \frac{d\zeta}{\bar{k}(\bar{S}(\zeta, \bar{\tau}; \bar{V}_c))} \right)^2 + 4\bar{R}\tilde{H}_w(\bar{\tau}, \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{d\zeta}{\bar{k}(\bar{S}(\zeta, \bar{\tau}; \bar{V}_c))} \right). \quad (2.78)$$

Далі, враховуючи, що

$$\int_0^{\bar{t}} \bar{V}(\zeta; \bar{V}_c) d\zeta = \bar{\tau} = \bar{V}_c \bar{t}, \quad (2.79)$$

обидві частини рівняння (2.78) інтегруються по  $\bar{t}$  в межах від 0 до  $\bar{t}$ . Таким чином виводиться рівняння, яке зв'язує параметр  $\bar{V}_c$  і час  $\bar{t}$  неявним чином,

$$2\bar{R}\bar{V}_c\bar{t} = \int_0^{\bar{t}} \left[ \sqrt{\left( \int_0^1 \frac{d\eta}{\bar{k}(\bar{S}(\eta, \zeta; \bar{V}_c))} \right)^2} + 4\bar{R}\tilde{H}_W(\zeta; \bar{V}_c) - \int_0^1 \frac{d\eta}{\bar{k}(\bar{S}(\eta, \zeta; \bar{V}_c))} \right] d\zeta. \quad (2.80)$$

Вираз для безрозмірної функції рівня непроясненої води вище завантаження може бути отриманий двома шляхами. Більш простий шлях полягає в інтегруванні рівняння (2.51) в межах від 0 до  $\bar{t}$  без додаткових спрощень, тоді

$$\psi_V(\tilde{H}_W(\bar{t}) - \tilde{H}_m) = \bar{t} - \bar{\tau} = \bar{t} - \bar{V}_c\bar{t}. \quad (2.81)$$

Таким чином

$$\tilde{H}_W(\bar{t}; \bar{V}_c) = \tilde{H}_m + \frac{1 - \bar{V}_c}{\psi_V} \bar{t}, \quad (2.82)$$

де  $\tilde{H}_m$  – визначалося раніше при теоретичному аналізі другої стадії роботи фільтра (2.33).

Підстановка (2.82) в (2.80), а також перехід від  $\bar{\tau}$  до  $\bar{t}$  у відповідності з (2.79) дає шукане рівняння, яке по суті виражає залежність між  $\bar{V}_c$  і  $\bar{t}$ . Такий же перехід виконується і у виразах для обох концентрацій, що в результаті дає

$$\begin{aligned} \bar{C}(\bar{z}, \bar{t}; \bar{V}_c) = e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1} \bar{z}} & \left[ e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^q \bar{t}} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-1} \bar{z} \bar{t}}) + \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \int_0^{\bar{V}_c \bar{t}} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \eta} \right. \\ & \left. \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{z} \eta}) d\eta \right], \end{aligned} \quad (2.83)$$

$$\bar{S}(\bar{z}, \bar{t}; \bar{V}_c) = \bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1} \cdot e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1} \bar{z}} \int_0^{\bar{V}_c \bar{t}} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{z} \eta}) d\eta. \quad (2.84)$$

З формул (2.83), (2.84) витікають важливі наслідки, а саме, закономірності зростання концентрації зависі у фільтраті на виході з фільтра і накопичення осаду у вхідному перерізі завантаження при  $\bar{t} \gg 0$ , які будуть визначатися таким чином:

$$\bar{C}_e(1, \bar{t}; \bar{V}_c) = e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1}} \left[ e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^q \bar{t}} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-1} \bar{t}}) + \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \int_0^{\bar{V}_c \bar{t}} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \eta} \right.$$



$$\cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{z} \eta}) d\eta], \quad (2.85)$$

$$\bar{S}_0(\bar{t}; \bar{V}_c) = \bar{S}(0, \bar{t}; \bar{V}_c) = \frac{\bar{\alpha}_v}{\bar{\beta}_v} V_c^{l-q} (1 - e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^q \bar{t}}). \quad (2.86)$$

Отже, прогноз розвитку комплексного технологічного процесу фільтрування слабоконцентрованої суспензії передбачає розрахунок: по-перше, концентраційних характеристик  $\bar{C}$ ,  $\bar{S}$  за формулами (2.83), (2.84), по-друге, гідравлічних характеристик  $\bar{V}$ ,  $\tilde{H}_w$ , відповідно, за формулою (2.82) і перетвореною залежністю (2.78), а саме

$$\bar{V}(\bar{t}; \bar{V}_c) = \frac{1}{2R} \left( \sqrt{\left( \int_0^1 \frac{d\zeta}{k(\bar{S}(\zeta, \bar{t}; \bar{V}_c))} \right)^2 + 4R\tilde{H}_w(\bar{t}; \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{d\zeta}{k(\bar{S}(\zeta, \bar{t}; \bar{V}_c))} \right). \quad (2.87)$$

При встановленні залежності для визначення приведенного напору рівняння (2.56) інтегрується в межах від 0 до 1

$$\tilde{h}(\bar{z}, \bar{t}; \bar{V}_c) = \bar{V}(\bar{t}; \bar{V}_c) \int_0^1 \frac{d\zeta}{k(\bar{S}(\zeta, \bar{t}; \bar{V}_c))}. \quad (2.88)$$

Для того, щоб отримати повну фізичну картину, яка складається і розвивається в шарі завантаження і на виході з нього, необхідно попередньо знайти закономірність зміни з часом відносної середньої швидкості фільтрування  $\bar{V}_c$ , що можна зробити за формулою (2.80). Тільки після цього стає реальним визначення просторово-часових змін шуканих характеристик. Отриманий вище набір розрахункових формул і рівнянь є надійним інструментом для обґрунтування технологічних параметрів і в першу чергу трьох технологічних часів – часу захисної дії завантаження, часу досягнення мінімально допустимої швидкості фільтрування і терміну фільтроциклу.

Аналіз отриманих загальних залежностей (2.85), (2.86) дозволив отримати відомі розрахункові формули для часткового випадку, коли процес фільтрації відбувається при постійній швидкості фільтрування. Залежності, які описують зміну за висотою фільтра відносної концентрації частинок забруднень у воді, що фільтрується ( $\bar{C}$ ), і відносної концентрації затриманих завантаженням забруднень ( $\bar{S}$ ), відповідно, мають вигляд:

$$\bar{C}(\bar{z}, \bar{t}) = e^{-\bar{\alpha}\bar{z}} [e^{-\bar{\beta}\bar{t}} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}\bar{\beta}\bar{z}\bar{t}}) + \beta \int_0^{\bar{t}} e^{-\bar{\beta}\eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}\bar{\beta}\bar{z}\eta}) d\eta], \quad (2.89)$$

$$\bar{S}(\bar{z}, \bar{t}) = \bar{\alpha} \cdot e^{-\bar{\alpha}\bar{z}} \int_0^{\bar{t}} e^{-\bar{\beta}\eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}\bar{\beta}\bar{z}\eta}) d\eta, \quad (2.90)$$

де  $\bar{\alpha} = \frac{\alpha L}{V_m}$  і  $\bar{\beta} = \frac{\beta n_0 L}{V_m}$  – відносні коефіцієнти, відповідно, прилипання і відриву частинок забруднень від часток завантаження.

Запропоновані вище залежності для розрахунку основних технологічних характеристик швидких фільтрів, що працюють зі змінною в часі швидкістю фільтрування (2.80 – 2.90), отримані на базі наближеного розв'язку математичної моделі, яка описує процес руху рідини і видалення забруднень пористим завантаженням швидких фільтрів. Для оцінки величини можливої похибки, що виникає при цьому, доцільно провести порівняння одержаних даних з результатами розрахунку за формулами, які отримані в результаті точного аналітичного розв'язку вихідних рівнянь. Такий розв'язок і відповідні формули для випадку прийняття величини показників степені  $l = q = 1$  у виразах (2.38), отримані В.Л. Поляковим і приведені в роботі [90]. Для порівняння і аналізу розглянемо залежності для визначення величини відносної концентрації забруднень на виході з фільтра ( $\bar{C}_e$ ) і зміни відносної швидкості фільтрування з часом ( $\bar{C}$ ), які мають вигляд

$$\bar{C}_e(\tau) = e^{-\bar{\alpha}_v} [e^{-\bar{\beta}_v\tau} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v\bar{\beta}_v\tau}) + \bar{\beta}_v \int_0^{\tau} e^{-\bar{\beta}_v\eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v\bar{\beta}_v\eta}) d\eta], \quad (2.91)$$

$$\bar{V}(\tau) = \left( \int_0^1 \frac{d\bar{z}}{[1 - \bar{\gamma}\bar{S}(\bar{z}, \tau)]^3} \right)^{-1}. \quad (2.92)$$

Результати розрахунку вказаних параметрів при величині відносних коефіцієнтів  $\bar{\beta}_v = 0,005$ ,  $\bar{\gamma} = 0,001$ , для різних значень  $\bar{\alpha}_v$  приведені, відповідно, на рис. 2.2 і 2.3.

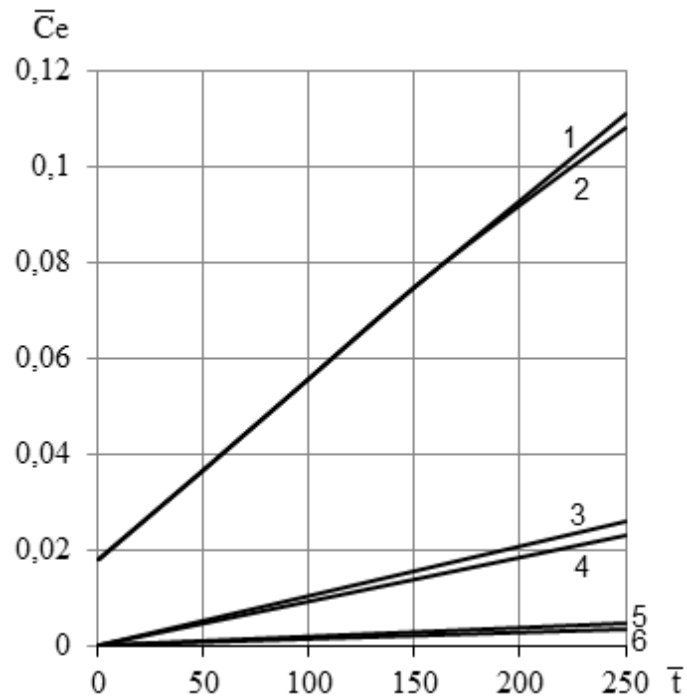


Рис. 2.2. Відносна концентрація забруднень на виході з фільтра при:  
 2,4,6 – точні розв’язки; 1,3,5 – наближені розв’язки.  
 1,2 –  $\alpha_V = 4$ ; 3,4 –  $\alpha_V = 6$ ; 5,6 –  $\alpha_V = 8$

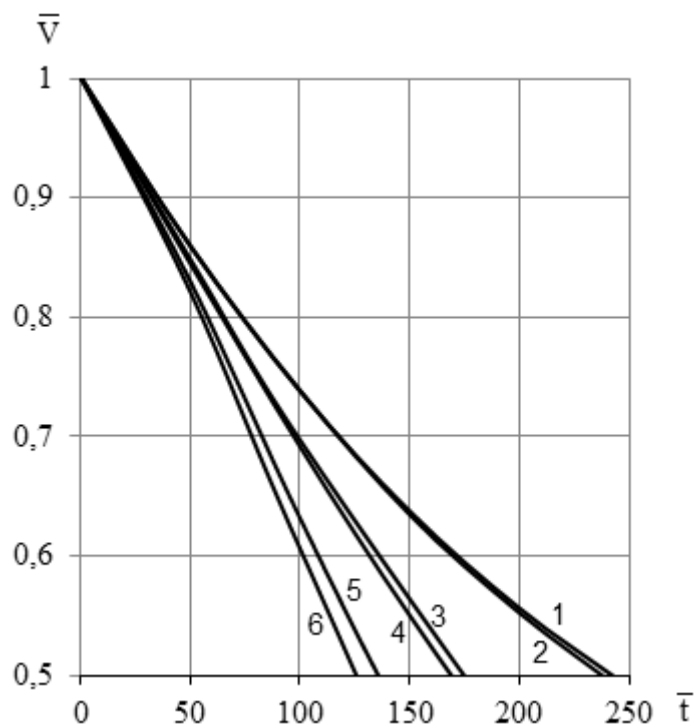


Рис. 2.3. Відносна швидкість руху рідини при:  
 2,4,6 – точні розв’язки; 1,3,5 – наближені розв’язки.  
 1,2 –  $\alpha_V = 4$ ; 3,4 –  $\alpha_V = 6$ ; 5,6 –  $\alpha_V = 8$

Як слідує з представлених графіків дані, отримані за двома методиками, практично співпадають між собою (розходження до 5%) в реальному діапазоні

зміни характеристик швидких фільтрів, що свідчить про можливість і правомірність застосування запропонованої в роботі наближеної методики розрахунку розглядуваних споруд.

### 2.3. Розрахунок часу ефективної роботи фільтра

Найважливішим технологічним параметром, який диктує оператору фільтрувальної установки термін закінчення чергового робочого циклу і початку промивки фільтра, є тривалість фільтроцикла  $t_f$ , оскільки вона, разом з витратною характеристикою (швидкістю фільтрування), визначає продуктивність фільтрувальної установки і вартість очистки води [65, 79]. Приймаючи до уваги велике практичне значення цього параметра, його рекомендується визначати розрахунковим шляхом, спираючись на сучасні математичні моделі фільтрування слабokonцентрованих суспензій і їх коректні розв'язки.

Фільтр при роботі як з постійною, так і зі змінною витратою повинен забезпечувати високу якість очистки води. Тому в першу чергу ефективність його роботи в обох режимах оцінюється за допомогою критерію якості, який формулюється у вигляді умови

$$C_e \leq C_{e*}, \quad (2.93)$$

де  $C_e$  – вихідна (кінцева) об'ємна (масова) концентрація зависів,  $C_{e*}$  – її гранично допустиме значення у відповідності з санітарними нормами.

Час, протягом якого забезпечується необхідна задана якість очистки води (умова 2.93), називається часом захисної дії завантаження фільтра  $t_p$ .

Одночасно з критерієм якості при роботі фільтра необхідно забезпечувати другий (гідравлічний) критерій, який накладає жорстке обмеження на час прояснювальної дії фільтра через зменшення пропускну здатності фільтруючого матеріалу протягом часу.

При збереженні швидкості фільтрування постійною утворена акумуляція осаду в завантаженні призводить до зростання втрат напору,

компенсувати який вдається тільки до певної міри. В подальшому, однак, швидкість фільтрування починає знижуватися. Тим не менш ще деякий час вихід фільтрату буде залишатися досить високим, що виправдує продовження експлуатації фільтра и при швидкості  $V$ , що зменшується.

Якщо ж фільтрувальна установка діє з заданими на підвідному і відвідному колекторах фіксованими напорами, то зниження  $V$  має місце вже на початку фільтроциклу, і з часом може стати досить суттєвим. При цьому часто виникає ситуація, коли якість фільтрату залишається високою, а продуктивність фільтра (добуток швидкості фільтрування на площу завантаження) знижується настільки, що його робота стає економічно не вигідною. Тому другим критерій оцінки ефективності фільтра виражається у вигляді одної з наступних умов:

$$V \geq V_*, \quad V_c \geq V_{c*}, \quad (2.94)$$

де  $V_*, V_{c*}$  – гранично допустимі, відповідно, поточна і середня за розрахунковий період швидкості фільтрування (питомі продуктивності фільтра).

Виконання критерію (2.94) гарантує економічно обґрунтовану інтенсивність розділення суспензії протягом всього фільтроциклу. Обґрунтовувати значення  $V_*, V_{c*}$  належить із застосуванням вартісних показників.

Час, протягом якого забезпечується необхідна якість очистки при технологічно заданій продуктивності (швидкість фільтрування), тобто умова (2.94), називається часом продуктивної роботи фільтра  $t_V$ .

Як вже вказувалось, при експлуатації фільтра за рахунок затримання частинок забруднень з часом відбувається замулювання фільтруючого завантаження, що призводить до збільшення втрат напору в ньому, а це в свою чергу викликає підвищення рівня вихідної води над фільтруючим шаром.

В залежності від конструктивних особливостей і схеми підключення фільтра накопичення води, яка очищається, вище фільтруючого завантаження

також може регламентувати режим роботи очисної споруди. Для цих умов, при фільтруванні зі швидкістю, що зменшується, одночасно з розглянутими традиційними критеріями якості очистки і економічності роботи споруди слід враховувати третій технічний критерій, який відображає обмеженість акумулюючої ємності фільтра. На практиці це виражається обмеженістю висоти шару води над зернистим завантаженням у вигляді умови

$$H_W \leq H_{W*}. \quad (2.95)$$

Зазвичай тривалість фільтроциклу  $t_f$  можна ототожнювати з найменшим з трьох характерних часів – часом захисної дії завантаження  $t_p$ , часом зниження швидкості фільтрування до гранично допустимої величини  $t_V$  і часом підйому рівня води до максимально допустимого  $t_H$ . З формальної точки зору це означає, що

$$t_f = \min(t_p, t_V, t_H). \quad (2.96)$$

На практиці при постійній швидкості фільтрування часто промивку починають як тільки накопичення вихідної води вище завантаження досягає певного рівня (стакан фільтра повністю наповниться). Проте, при швидкості фільтрування, що зменшується з часом, як правило, до цього моменту прояснювальний ресурс фільтра ще не вичерпується і доцільно було б ще деякий час продовжувати його роботу. Ця ситуація виникає тому, що в цьому випадку рівень води над завантаженням зростає повільніше ніж відбувається падіння швидкості. Очевидно, що для обчислення часу фільтроциклу  $t_f$  згідно (2.96), спочатку слід задаватись системою критеріальних параметрів  $C_e^*$ ,  $V^*$ ,  $H_{W*}$ , які дозволяють контролювати якість розділення суспензії ( $C^*$ ), продуктивність фільтра ( $V^*$ ) і кількість накопиченої в ньому неочищеної води ( $H_{W*}$ ).

З рівняння (2.96) витікає, що для знаходження  $t_f$  необхідно розрахувати і співставити три вказані проміжки часу. В сучасній практиці фільтрування  $t_p$ ,  $t_V$ ,  $t_H$  встановлюються, відповідно, експрес-аналізами якості фільтрату, показниками лічильників для води і датчиками рівня води. Окрім того, використовуються наближені емпіричні формули [30, 65, 119] область

застосування яких обмежується умовами проведених дослідів. На основі виконаного в даній роботі аналізу нами запропоновані аналітичні формули до розрахунку тривалості фільтроциклу для режиму фільтрування з постійною витратою  $Q_{in}$ .

Відносний час захисної дії завантаження  $\bar{t}_p$ , виходячи з вимоги не перевищувати нормативної концентрації за висі  $C_{e*}$ , пропонується знаходити з системи двох рівнянь, яка включає отриману вище залежність (2.80) і модифіковане рівняння (2.83), в яких  $\bar{t}$  вважається рівним  $\bar{t}_p$ , отримаємо

$$2\bar{R}\bar{V}_c\bar{t}_p = \int_0^{\bar{t}_p} \left[ \sqrt{\left( \int_0^1 \frac{d\eta}{\bar{k}(\bar{S}(\eta, \zeta; \bar{V}_c))} \right)^2 + 4\bar{R}\bar{H}_w(\zeta; \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{d\eta}{\bar{k}(\bar{S}(\eta, \zeta; \bar{V}_c))} \right] d\zeta, \quad (2.97)$$

$$\bar{C}(\bar{z}, \bar{t}_p; \bar{V}_c) = e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1} \bar{z}} \left[ e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^q \bar{t}_p} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-1} \bar{z} \bar{t}_p}) + \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \int_0^{\bar{V}_c \bar{t}_p} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{z} \eta}) d\eta \right]. \quad (2.98)$$

Відносний час  $\bar{t}_V$  зниження швидкості фільтрування до мінімально допустимої  $V_*$  розраховуємо з використанням системи, яка також містить залежність (2.80) і рівняння (2.87) при  $\bar{t} = \bar{t}_V$

$$2\bar{R}\bar{V}_c\bar{t}_V = \int_0^{\bar{t}_V} \left[ \sqrt{\left( \int_0^1 \frac{d\eta}{\bar{k}(\bar{S}(\eta, \zeta; \bar{V}_c))} \right)^2 + 4\bar{R}\bar{H}_w(\zeta; \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{d\eta}{\bar{k}(\bar{S}(\eta, \zeta; \bar{V}_c))} \right] d\zeta, \quad (2.99)$$

$$\bar{V}(\bar{t}_V; \bar{V}_c) = \frac{1}{2\bar{R}} \left( \sqrt{\left( \int_0^1 \frac{d\zeta}{\bar{k}(\bar{S}(\zeta, \bar{t}_V; \bar{V}_c))} \right)^2 + 4\bar{R}\bar{H}_w(\bar{t}_V; \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{d\zeta}{\bar{k}(\bar{S}(\zeta, \bar{t}_V; \bar{V}_c))} \right). \quad (2.100)$$

Відносний час  $\bar{t}_H$  досягнення максимального рівня води над завантаженням  $H_{w*}$  визначаємо використовуючи вихідне рівняння (2.80) і залежність (2.82) при  $\bar{t} = \bar{t}_H$

$$2\bar{R}\bar{V}_c\bar{t}_H = \int_0^{\bar{t}_H} \left[ \sqrt{\left( \int_0^1 \frac{d\eta}{\bar{k}(\bar{S}(\eta, \zeta; \bar{V}_c))} \right)^2 + 4\bar{R}\bar{H}_w(\zeta; \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{d\eta}{\bar{k}(\bar{S}(\eta, \zeta; \bar{V}_c))} \right] d\zeta, \quad (2.101)$$

$$\tilde{H}_W(\bar{t}; \bar{V}_c) = \tilde{H}_m + \frac{1 - \bar{V}_c}{\psi_V} \bar{t}_H. \quad (2.102)$$

Розрахунок технологічних часів  $\bar{t}_p$ ,  $\bar{t}_v$ ,  $\bar{t}_H$  доводиться здійснювати підбором, розв'язуючи три системи рівнянь, які в неявній формі зв'язують  $\bar{t}_p$ ,  $\bar{t}_v$ ,  $\bar{t}_H$ , з параметром  $\bar{V}_c$ . При розрахунках рекомендується використовувати програмне забезпечення ПК “Mathcad”, ” Matlab“ та ін. Після розрахунку  $\bar{t}_p$ ,  $\bar{t}_v$ ,  $\bar{t}_H$  за час фільтроциклу  $\bar{t}_f$  приймається менше з трьох значень.

#### 2.4. Теоретичне обґрунтування раціональної висоти фільтруючого завантаження

Одним з найважливіших конструктивних параметрів водоочисних фільтрів є висота шару завантаження  $L$  [85]. Її невдалий вибір може призводити до значного скорочення часу їх безперервної роботи. Збільшення вказаної висоти здійснює подвійний вплив на роботу фільтра. З одного боку збільшується час перебування в завантаженні завислих речовин і, як наслідок, знижується їх вміст у фільтраті. З іншого боку зростає гідравлічний опір завантаження внаслідок подовження шляху рідини і додаткового осадження зависі. Тому велике значення набуває наукове обґрунтування висоти завантаження, яке буде надійним тільки завдяки застосуванню методів математичного моделювання.

При проектуванні фільтрів можливі різноманітні підходи до встановлення раціональної величини  $L$ . Універсальним є підбір, який базується на врахуванні економічних міркувань. В цьому випадку шукану  $L$  пропонується оптимізувати в технологічному відношенні – фактично вирішувати задачу знаходження значення  $L$ , при якому тривалість фільтроциклу  $t_f$  досягає максимуму. Подібний підхід має економічний зміст,



оскільки вартість прояснення води тісно пов'язана з тривалістю фільтроциклу  $t_f$ .

В основі запропонованої методики розрахунку висоти  $L$  лежать рівняння, які призначені для визначення технологічних часів і отримані нами вище (2.97), (2.98), (2.100), (2.102). Проте, застосовувати їх безпосередньо для пошуку підходящих значень  $L$  складно через безрозмірну форму останніх. При цьому  $L$  використовується в якості масштабу. В зв'язку з цим вказані залежності слід попередньо трансформувати для того, щоб, зберігаючи їх узагальнену форму виділити особливий параметр, який в подальшому аналізі буде цілеспрямовано варіюватися. В якості такого параметра зручно взяти параметр  $\bar{L} = \frac{L}{L_0}$ , де  $L_0$  – мінімальне з усіх допустимих на практиці значень  $L$ .

При виборі способу трансформації наведених рівнянь розглянемо дві характерні для промислового фільтрування ситуації, які обумовлені фактичними можливостями у забезпеченні фільтруючим матеріалом. Якщо матеріал є дешевим та доступним у практично необмежених кількостях, то у розрахунках недоцільно варіювати розміри вхідної поверхні завантаження, його об'єм виправдано вважати прямо пропорційним висоті  $L$ . У другій, більш типовій ситуації, вищезгаданий матеріал необхідної якості зазвичай є дефіцитним і дорогим. Тому необхідно вимагати від нього при економному використанні максимальної віддачі. Тоді, при обґрунтовані  $L$  бажано виходити з обмеженості ресурсу матеріалу і фіксувати його робочий об'єм. Обидва способи послідовно реалізовані при проведенні технологічного аналізу прояснювальної дії фільтру.

В першому випадку вважається, що висота і об'єм фільтра синхронно змінюються при інших незмінних модельних параметрах. Вводиться новий масштаб довжини, а саме –  $L_0$ . Тоді змінні, які входять в базові рівняння відносно безрозмірного часу захисної дії завантаження  $\bar{t}_p$ , часу зниження швидкості фільтрування (продуктивності фільтра) до гранично допустимої

величини  $\bar{t}_V$  і часу досягнення максимально допустимої висоти шару вод над завантаженням  $\bar{t}_H$  стають функціями від  $\bar{L}$ , а саме

$$\bar{z}(\bar{L}) = \frac{\bar{z}_0}{\bar{L}}, \quad \bar{z}_0 = \frac{z}{L_0}; \quad \bar{t}(\bar{L}) = \frac{\bar{t}_0}{\bar{L}}, \quad \bar{t}_0 = \frac{Q_{in} t}{n_0 \omega L_0}; \quad \bar{\alpha}_v(\bar{L}) = \bar{\alpha}_{vm} \bar{L},$$

$$\bar{\alpha}_{vm} = \alpha_v L_0 \left( \frac{Q_{in}}{\omega} \right)^{l-1}; \quad \bar{\beta}_v(\bar{L}) = \bar{\beta}_{vm} \bar{L}, \quad \bar{\beta}_{vm} = \beta_v n_0 L_0 \left( \frac{Q_{in}}{\omega} \right)^{q-1}, \quad \bar{V}_c = \frac{\omega V_c}{Q_{in}}. \quad (2.103)$$

Час  $\bar{t}_{0p}$  (відповідає  $t = t_p$ ) пропонується обчислювати із отриманої після нескладних перетворень залежності (2.98)

$$e^{-\bar{\beta}_{vm} \bar{V}_c^{q-1} \bar{t}_{0p}} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_{vm} \bar{\beta}_{vm} \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{t}_{0p} \cdot \bar{L}}) +$$

$$+ \bar{\beta}_{vm} \bar{V}_c^{q-1} \int_0^{\bar{V}_c \bar{t}_{0p}} e^{-\bar{\beta}_{vm} \bar{V}_c^{q-1} \zeta} I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_{vm} \bar{\beta}_{vm} \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{L} \zeta}) d\zeta = \bar{C}_* e^{\bar{\alpha}_{vm} \bar{V}_c^{l-1} \bar{L}}. \quad (2.104)$$

При цьому зв'язок між параметрами  $\bar{V}_c$  і  $\bar{t}_{0p}$  описується рівнянням

$$\int_0^{\bar{t}_{0p}} \left[ \sqrt{\left( \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \bar{V}_c, \bar{L}))} \right)^2} + 4\bar{R}_0 \tilde{H}_w(\zeta; \bar{V}_c, \bar{L}) - \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \bar{V}_c, \bar{L}))} \right] d\zeta = 2\bar{R}_0 \bar{V}_c \bar{t}_{0p}. \quad (2.105)$$

Тут, оцінюючи залежність  $L$  для прояснювального ефекту, слід приймати

$$\tilde{H}_w(\zeta; \bar{V}_c, \bar{L}) = \tilde{H}_m(\bar{L}) + (1 - \bar{V}_c) \bar{L} \zeta; \quad \tilde{H}_m(\bar{L}) = \bar{L} + \bar{R}_0; \quad \bar{R}_0 = \frac{\omega^2 k_0^2 \Delta h_0}{L_0^2} R.$$

Аналогічна система рівнянь для пар значень  $\bar{V}_c$  і  $\bar{t}_{0V}$  буде

$$\sqrt{\left( \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \bar{t}_{0v}; \bar{V}_c, \bar{L}))} \right)^2} + 4\bar{R}_0 \tilde{H}_w(\bar{t}_{0v}; \bar{V}_c, \bar{L}) - \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \bar{t}_{0v}; \bar{V}_c, \bar{L}))} = 2\bar{R}_0 \bar{V}_*, \quad (2.106)$$

$$\int_0^{\bar{t}_{0V}} \left[ \sqrt{\left( \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \bar{V}_c, \bar{L}))} \right)^2} + 4\bar{R}_0 \tilde{H}_w(\zeta; \bar{V}_c, \bar{L}) - \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \bar{V}_c, \bar{L}))} \right] d\zeta = 2\bar{R}_0 \bar{V}_c \bar{t}_{0V}. \quad (2.107)$$

Для пари значень  $\bar{V}_c$  і  $\bar{t}_{0H}$  отримаємо

$$\tilde{H}_{W^*}(\bar{t}_H; \bar{V}_c; \bar{L}) = \tilde{H}_m + \frac{1 - \bar{V}_c}{\psi_V} \bar{t}_H, \quad (2.108)$$

$$\int_0^{\bar{t}_{0H}} \left[ \sqrt{\left( \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \bar{V}_c, \bar{L}))} \right)^2 + 4\bar{R}_0 \tilde{H}_w(\zeta; \bar{V}_c, \bar{L})} - \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \bar{V}_c, \bar{L}))} \right] d\zeta = 2\bar{R}_0 \bar{V}_c \bar{t}_{0H}. \quad (2.109)$$

В системах (2.104), (2.105); (2.106), (2.107) і (2.108), (2.109) якість фільтрату, продуктивність фільтра і рівень води над завантаженням регламентуються відносними гранично допустимими значеннями концентрацій зависі  $\bar{C}_* = \frac{C_*}{C_0}$ , швидкості  $\bar{V}_* = \frac{\omega V_*}{Q_{in}}$  і глибини  $\tilde{H}_{W^*} = \frac{H_{W^*} - H_{out}}{\Delta h_m}$ .

Крім того,

$$\bar{S}(\bar{z}_0, \bar{t}_0; \bar{V}_c) = \bar{\alpha}_{vm} \bar{V}_c^{l-1} e^{-\bar{\alpha}_{vm} \bar{V}_c^{l-1} \bar{z}_0} \int_0^{\bar{V}_0 \bar{t}_0} e^{-\bar{\beta}_{vm} \bar{V}_c^{q-1} \eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_{vm} \bar{\beta}_{vm} \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{z}_0 \eta}) d\eta. \quad (2.110)$$

В другому випадку при високій вартості фільтруючого матеріалу в технологічних розрахунках слід жорстко обмежувати його робочий об'єм  $W$ .

Надалі приймається  $W = \omega L = const$ . Тоді через наявність однозначного зв'язку між  $\omega$  і  $L$  в деяких змінних і параметрах з (2.104) – (2.110) для збереження безрозмірної форми базових рівнянь доводиться позбутися від  $\omega$ , замінюючи його на  $W/L$ . Таким чином у вказаних рівняннях після простих перетворень з'являються наступні відносні величини

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \bar{L} \tilde{t}, \quad \tilde{t} = \frac{Q_{in} t}{n_0 W}; \quad \bar{\alpha}_v(\bar{L}) = \tilde{\alpha}_{vm} \bar{L}^l, \quad \tilde{\alpha}_{vm} = \alpha_v L_0^l \left( \frac{Q_{in}}{W} \right)^{l-1}; \quad \bar{\beta}_v(\bar{L}) = \tilde{\beta}_{vm} \bar{L}^q, \\ \tilde{\beta}_{vm} &= \beta_v n_0 L_0^q \left( \frac{Q_{in}}{W} \right)^{q-1}; \quad \bar{V}_c = \frac{\tilde{V}_c}{\bar{L}}, \quad \tilde{V}_c = \frac{W V_c}{L_0 Q_{in}}; \quad \bar{R}_0 = \frac{\tilde{R}}{\bar{L}^2}, \quad \tilde{R} = \frac{k_o^2 W^2 \Delta h_0}{L_0^4} R. \end{aligned} \quad (2.111)$$

Перша система рівнянь відносно взаємопов'язаних значень  $\tilde{t}_p$  і  $\tilde{V}_c$  буде

$$\begin{aligned} & e^{-\tilde{\beta}_{vm} \tilde{V}_c^{q-1} \bar{L} \tilde{t}_p} \cdot I_0(2\sqrt{\tilde{\alpha}_{vm} \tilde{\beta}_{vm} \tilde{V}_c^{l+q-2} \tilde{t}_p \cdot \bar{L}^2}) + \\ & + \tilde{\beta}_{vm} \tilde{V}_c^{q-1} \int_0^{\tilde{V}_c \tilde{t}_p} e^{-\tilde{\beta}_{vm} \tilde{V}_c^{q-1} \zeta} I_0(2\sqrt{\tilde{\alpha}_{vm} \tilde{\beta}_{vm} \tilde{V}_c^{l+q-2} \bar{L} \zeta}) d\zeta = \bar{C}_* e^{\tilde{\alpha}_{vm} \tilde{V}_c^{l-1} \bar{L}}, \end{aligned} \quad (2.112)$$

$$\int_0^{\tilde{t}_p} \left[ \sqrt{\left( \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \tilde{V}_c, \bar{L}))} \right)^2 + 4 \frac{\tilde{R}}{\bar{L}^2} \tilde{H}_w(\zeta; \tilde{V}_c, \bar{L})} - \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \tilde{V}_c, \bar{L}))} \right] d\zeta = \frac{2\tilde{R}\tilde{V}_c}{\bar{L}^2} \tilde{t}_p. \quad (2.113)$$

Для обчислення другої пари значень  $\tilde{t}_V$  і  $\tilde{V}_c$  пропонується розв'язувати другу систему рівнянь, а саме,

$$\left[ \sqrt{\left( \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \tilde{V}_c, \bar{L}))} \right)^2 + 4 \frac{\tilde{R}}{\bar{L}^2} \tilde{H}_w(\zeta; \tilde{V}_c, \bar{L})} - \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \tilde{t}_V; \tilde{V}_c, \bar{L}))} \right] = 2 \frac{\tilde{R}\tilde{V}_c}{\bar{L}^2}, \quad (2.114)$$

$$\int_0^{\tilde{t}_V} \left[ \sqrt{\left( \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \tilde{V}_c, \bar{L}))} \right)^2 + 4 \frac{\tilde{R}}{\bar{L}^2} \tilde{H}_w(\zeta; \tilde{V}_c, \bar{L})} - \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \tilde{V}_c, \bar{L}))} \right] d\zeta = \frac{2\tilde{R}\tilde{V}_c}{\bar{L}^2} \tilde{t}_V. \quad (2.115)$$

Для третього випадку  $\tilde{t}_H$  і  $\tilde{V}_c$  будемо мати

$$\tilde{H}_{W*}(\tilde{t}_H; \tilde{V}_c; \bar{L}) = \tilde{H}_m + \frac{1 - \tilde{V}_c}{\psi_V} \tilde{t}_H, \quad (2.116)$$

$$\int_0^{\tilde{t}_H} \left[ \sqrt{\left( \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \tilde{V}_c, \bar{L}))} \right)^2 + 4 \frac{\tilde{R}}{\bar{L}^2} \tilde{H}_w(\zeta; \tilde{V}_c, \bar{L})} - \int_0^{\bar{L}} \frac{d\bar{z}_0}{\bar{k}(\bar{S}(\bar{z}_0, \zeta; \tilde{V}_c, \bar{L}))} \right] d\zeta = 2 \frac{\tilde{R}}{\bar{L}} \tilde{V}_c \tilde{t}_H, \quad (2.117)$$

тут  $\tilde{H}_w(\zeta; \tilde{V}_c, \bar{L}) = \tilde{H}_m(\bar{L}) + (\bar{L} - \tilde{V}_c) \bar{L} \zeta$ ,  $\tilde{H}_m(\bar{L}) = \bar{L}^2 + \tilde{R}$ ,

$$\bar{S}(\bar{z}_0; \tilde{t}_0; \tilde{V}_c) = \tilde{\alpha}_{vm} \tilde{V}_c^{l-1} e^{-\tilde{\alpha}_{vm} \tilde{V}_c^{l-1} \bar{z}_0} \int_0^{\tilde{V}_c \zeta} e^{-\tilde{\beta}_{vm} \tilde{V}_c^{q-1} \eta} \cdot I_0(2\sqrt{\tilde{\alpha}_{vm} \tilde{\beta}_{vm} \tilde{V}_c^{l+q-2} \bar{z}_0 \eta}) d\eta. \quad (2.118)$$

Перевагою розглянутої методики розрахунку (залежності 2.112 – 2.117) є те, що при її використанні можливо визначити висоту (товщину) фільтруючого завантаження в очисній споруді, яка на протязі заданого часу роботи, одночасно буде задовольняти три необхідні умови (2.93 – 2.95). Типовий графік, за допомогою якого можна визначити необхідну висоту завантаження приведений на рис. 2.4.

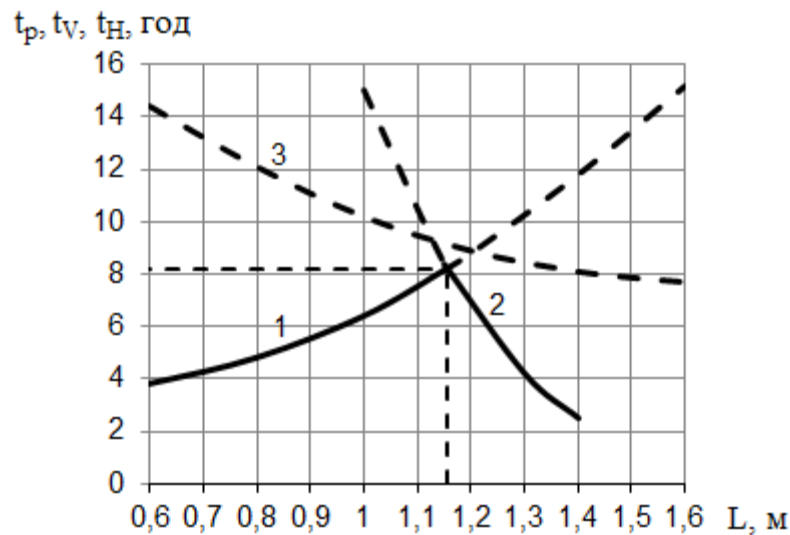


Рис. 2.4. Визначення мінімальної висоти завантаження фільтра  $L$ , при якій буде забезпечено: 1.  $\bar{C}_e = 0,1$ ; 2.  $\bar{V}_* = 0,7$ ; 3.  $\bar{H}_{w*} = 2,0$

На представленому графіку прийнята висота завантаження ( $L$ ) буде забезпечувати: крива (1) – кінцеву відносну концентрацію забруднень  $\bar{C}_* = 0,1$ ; крива (2) – мінімально допустиму відносну швидкість фільтрування  $\bar{V}_* = 0,7$ ; крива (3) - висоту шару води над завантаженням  $\bar{H}_{w*} = 2$ . Аналіз графіка дозволяє прийняти висоту завантаження  $L = 1,15$  м.

## 2.5. Висновки по розділу 2

Проведений в даному розділі теоретичний аналіз математичних моделей, які описують умови роботи фільтрів зі змінною в часі швидкістю фільтрування дозволяє зробити наступні основні висновки.

1. Для описання роботи фільтрів, що працюють в даних умовах запропонована математична модель, яка складається з трьох блоків: прояснювального, що включає рівняння масопереносу та лінійної кінетики масообміну; фільтраційного – рівняння руху води в пористому завантаженні, зміну гідравлічного опору його матеріалу та дольовий вміст твердих частинок в осаді; гідравлічного, до складу якого входить рівняння втрат напору в комунікаціях і рівняння, яке описує динаміку зміни рівня вихідної води над

фільтруючим завантаженням. Аргументовано визначені початкові і граничні умови.

2. Обґрунтовано аналітичний розв'язок математичної моделі, за допомогою якого отримано достатньо прості і зручні у користуванні розрахункові формули, а саме: інтенсивність видалення забруднень і їх накопичення за висотою фільтра з часом; визначення величини втрат напору в зернистому завантаженні і висоти шару сирі води над ним.

3. Умовно технологічний процес прояснення на фільтрі пропонується розділити на три стадії: перші дві стадії вважаються початковими і є короткочасними, в цей період у фільтрі відбувається незначне накопичення осаду, формування і відчутний підйом поверхневого шару сирі води. Третя стадія, протягом якої відбувається безпосередній процес затримання забруднень, вважається основною.

5. Встановлено, що коефіцієнти прилипання  $\alpha$  і відриву частинок забруднень  $\beta$  від часток фільтрувального завантаження для розглядуваного процесу є змінними в часі параметрами, які залежать від швидкості фільтрування.

5. Обґрунтовано методику розрахунку часу ефективної роботи фільтра (фільтроциклу), протягом якого буде забезпечуватись технологічно заданий ефект очистки.

6. Отримані достатньо прості залежності для визначення оптимальної висоти фільтрувального завантаження, яка буде забезпечувати надійні умови роботи фільтрувальної споруди.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ШВИДКИХ ФІЛЬТРІВ

#### 3.1. Задачі експериментальних досліджень

Представлений в даній роботі матеріал умовно можна розділити на дві частини – теоретичну і експериментальну. Розділи 1 і 2 в основному присвячені аналізу вихідних математичних моделей, які описують процес фільтрування рідини зі змінною з часом швидкістю. В результаті отримано відносно прості і зручні для розрахунку аналітичні залежності.

Разом з тим отримані результати потребують експериментальної перевірки і підтвердження. Дані експериментальних досліджень дозволять кількісно описати процеси, які відбуваються у фільтрах і у випадку необхідності внести необхідні корективи в розрахункові формули. Враховуючи викладене, при проведенні даних досліджень головне завдання полягало у вивченні закономірностей видалення забруднень зернистим завантаженням із рідини, а також їх накопиченням в тілі фільтра.

Отриманий в ході експериментальних досліджень матеріал дозволить вирішити наступні задачі:

1. Підтвердити і уточнити основні розрахункові формули, які отримані в результаті аналізу математичної моделі, яка описує процес фільтрації при змінній швидкості руху рідини, що прояснюється.

2. Визначити характер зміни при протіканні фільтраційного процесу величини коефіцієнта фільтрації, гідравлічного похилу і пористості зернистого завантаження.

3. З'ясувати зв'язок між величиною втрат напору, які виникають в тілі фільтра при фільтрації, і висотою (глибиною) шару води над завантаженням.

4. Дослідити вплив змінності швидкості при фільтруванні на основні характеристики процесу.

5. Визначити величину коефіцієнтів прилипання ( $\alpha$ ) і відриву ( $\beta$ ) частинок забруднень і їх залежність від швидкості фільтрування.

6. Знайти співвідношення між концентрацією затриманого в завантаженні осаду і наявністю в цьому осаді твердої фракції.

В залежності від особливостей поставленого експерименту, використовувалось відповідне робоче і вимірювальне обладнання та апаратура. Методики обробки отриманих результатів дослідів також відповідали поставленим задачам. Всі експерименти, що проводились, незалежно від їх складності звичайно закінчувалися поданням результатів і формулюванням висновків. Інформація представлялася у вигляді графіків, емпіричних формул, номограм, таблиць.

### **3.2. Умови фізичного моделювання процесів руху і очистки води на швидких фільтрах**

Як відомо [59] в практиці проведення досліджень використовують два основних методи моделювання явищ: математичний і фізичний.

Математичне моделювання базується на розгляді і аналізі математичних моделей, які описують той чи інший процес на основі аналогії з іншим процесом, що описується рівнянням того ж типу. Задача фізичного моделювання – відтворення у зменшеному масштабі досліджуваного явища. До даного типу відноситься моделювання гідравлічних і фільтраційних процесів. Розумне поєднання вказаних методів при моделюванні роботи швидких фільтрів, які працюють зі змінною швидкістю фільтрування, дасть можливість глибше вивчити механізми і основні фізичні закономірності явищ, що відбуваються.

В попередніх розділах даної роботи показано, що на сьогоднішній день існують загальновизнані вихідні диференціальні рівняння, за допомогою яких досить повно можна описати процес очистки води на швидких фільтрах зі швидкістю, яка змінюється в часі. Є спроби, в тому числі автора, різного



ступеня обґрунтованості по їх вирішенню. Також існує досить великий експериментальний матеріал з досліджуваного питання. Таким чином, прийняті умови моделювання даного процесу безумовно повинні базуватися на вже отриманих результатах.

При побудові моделі розглядуваного явища в першу чергу були проаналізовані відповідні системи диференціальних рівнянь, які описують умови роботи споруд, що працюють в режимі фільтрування рідини зі змінною швидкістю в часі.

Очевидно, що використовувані математичні моделі містять деяку схематизацію реального явища, оскільки в їх основі лежать гіпотези, що базуються на припущеннях, використання яких вносить певну невизначеність. Але вони все-таки є відображенням найбільш суттєвих сторін процесу. За їх допомогою можна отримати інформацію про взаємозв'язок між основними факторами, що впливають на об'єкт, який моделюється, знайти шляхи управління ним. Визначити параметри в точках факторного простору, в яких неможливе проведення безпосередніх вимірювань.

При фізичному моделюванні основною вимогою є забезпечення механічної подібності між моделлю і натурою, тобто їх геометричної, кінематичної і динамічної подібності. Іншими словами, необхідно щоб справджувався закон Ньютонів, згідно з яким явища, що мають однакову фізичну природу, повинні мати однакове значення однойменного критерію подібності, тобто

$$Ne = \frac{Fl}{MV^2} = \frac{F}{\rho V^2 l^2} = idem. \quad (3.1)$$

Однак, як показує практика, виконання приведеної умови можливе тільки в дуже вузькому діапазоні зміни параметрів. Окрім цього, для забезпечення подібності необхідно вірно сформулювати умови однозначності, тобто визначити ті ознаки, які належать і однозначно характеризують процес, що вивчається. До них відносять граничні і початкові умови. До складу

граничних умов треба перш за все віднести геометричні розміри як конструкції самої моделі, так і використаного фільтруючого зернистого завантаження.

Також необхідною умовою подібності є забезпечення фізичної подібності середовищ, в яких відбувається явище, тобто в'язкості і густини рідини, а також фізико-хімічних властивостей матеріалу забруднень. Таким самим повинен бути і режим руху потоку.

Математична модель і умови однозначності, які використовуються, повинні бути повними і коректними. Термін “повний” означає, що є достатня кількість незалежних рівнянь для визначення залежних величин і, крім цього, математична модель відповідає фізичній задачі з достатньою точністю в досліджуваному діапазоні зміни впливаючих змінних.

Термін “коректність” характеризує постановку математичної задачі. Зокрема відноситься до умов однозначності. Вважається, що задача поставлена коректно, якщо існує єдиний розв'язок рівняння з системою умов однозначності, від яких воно залежить безперервно.

Очевидно, що при забезпеченні подібності, вихідні рівняння які описують процес, будуть загальними для натурального (реального) і модельного потоків, але їх складові можуть змінюватися в масштабі моделювання. Тобто, кожна з характеристик, які входять в ці рівняння, для модельного потоку буде відрізнятися від її значення для натури на якусь постійну величину, яку називають масштабом моделювання. Причому, ці масштаби (константи подібності) можуть бути різними для кожного з параметрів. Вони також будуть мати різні значення при переході від однієї моделі до другої, а також залишатися постійними в усіх східних точках даної системи.

Аналізуючи умови роботи швидких фільтрів слід зазначити, що рух води в них відбувається в напірному режимі, для якого, як відомо, переважаючим є вплив сил в'язкості і конвективних сил інерції. При цьому, впливом масової сили (сили тяжіння), а відповідно і критерієм Фруда, можна знехтувати. Отже, подібність явищ в розглядуваному випадку буде забезпечуватися рівністю і постійністю критеріїв Рейнольдса і Ейлера.

Розглядаючи критерій Ейлера, слід зазначити, що він залежить від величини діючого тиску  $p$  і є залежною змінною від швидкості  $V$ , яка розраховується через число Рейнольдса. Таким чином, критерій  $Eu$  не є самостійним, а визначається через  $Re$  [94], тобто

$$Eu = f(Re). \quad (3.2)$$

Критерій Рейнольдса при цьому буде

$$Re = \frac{F}{\mu V l} = \frac{\rho l^2 V^2}{\mu l V} = \frac{l V}{\nu} = idem. \quad (3.3)$$

де  $l$  – характерний лінійний розмір.

Як показано в розділі 1 даної роботи, при напірному рівномірному русі в'язкої нестисливої рідини з домішками забруднень у фільтруючому зернистому завантаженні зміна концентрації ( $C$ ) і втрат напору ( $\Delta h$ ) є функцією таких величин

$$C = \Phi_1(x, V, C_0, t_1, d, B, T, \Gamma, 3) \quad (3.4)$$

$$i \quad \Delta h = \Phi_2(x, V, C_0, t_2, d, B, T, \Gamma, 3) \quad (3.5)$$

Для повної відповідності параметрів, які входять у функціональні залежності (3.4) і (3.5) моделі і натури, необхідно максимально наблизити характеристики і умови роботи модельної установки і реального фільтра.

Для цього при проектуванні і монтажі модельної установки були використані: реальне зернисте завантаження із кварцового піску, який використовується на діючих фільтрах; розрахункова швидкість  $V$  приймалась в межах 4 – 15 м/год ( $Re = 0,3 - 1,5$ ), що відповідає реальним умовам експлуатації; в якості замулючої речовини прийнята спондилова глина, яка за своїми фізико-хімічними властивостями близька до замулень в природній воді; висота дослідної фільтраційної колони близька до натурної висоти завантаження швидкого фільтра; діаметр колони прийнятий за умови виключення впливу бокових стінок на хід фільтрувального процесу; час роботи дослідної установки аналогічний часу експлуатації фільтра в реальних умовах.

Таким чином, використання модельної установки з прийнятими характеристиками дозволить обґрунтовано використовувати отримані в досліді дані для розрахунку і проектування реальних очисних споруд.

### 3.3. Планування експерименту

Базуючись на аналізі робіт, розглянутих у першому розділі, а також на результатах попередніх досліджень слід відмітити, що в даному випадку ми маємо справу з доволі складним явищем – фільтруванням рідини через зернисте завантаження зі змінною в часі швидкістю фільтрування, дослідження якого вимагало б проведення великої кількості експериментів. З метою скорочення кількості дослідів, а також для можливості найбільш повного вилучення інформації з отриманих даних, програма досліджень розроблялась з залученням елементів теорії планування експерименту.

Планування експерименту – це оптимальне керування експериментом при неповному знанні механізму явища [2]. Ціллю планування експерименту є можливість отримати максимальний об'єм корисної інформації при найкращому контролі і мінімальній витраті часу на її обробку.

За методикою проведення експерименти розрізняють на пасивні, активні і активно-пасивні. Пасивні експерименти базуються на реєстрації вхідних і вихідних параметрів, які характеризують об'єкт досліджень, без втручання в нього в процесі проведення. Використання математично-статистичних методів в цьому випадку здійснюється тільки після закінчення експерименту для обробки зібраних даних. Дослідження впливу сукупності факторів на результати експерименту проводиться за умови, що змінюється тільки один із факторів при фіксованих значеннях всіх інших. Активний експеримент передбачає можливість активного впливу на досліджуваний об'єкт. При використанні методів активного експерименту математичне описання будується у вигляді сукупності статистичних і динамічних вихідних характеристик об'єкта, які реєструються при подачі на його входи спеціальних

збуджуючих впливів. Активно-пасивний експеримент характеризується тим, що при його проведенні одна частина даних просто реєструється, а друга крім того обробляється в процесі експерименту і використовується при розробці керуючих впливів.

Нами у роботі використаний варіант активного експерименту [67, 68, 113], при якому штучні збурення вводяться у досліджувану систему за спеціальним планом, що має досить суворе математичне обґрунтування.

Планування базується на математичній теорії експерименту, основою якої є математична статистика. Застосування останньої виправдане тим, що як правило, в більшості експериментів їх результати зв'язані деякою невизначеністю. В результаті планування ми отримали оптимальний план виконання досліджень. Під останнім розуміють набір інструкцій і рекомендацій по проведенню експерименту, в яких вказується послідовність роботи, характер і величина перебору змінюваних параметрів, а також даються вказівки по проведенню повторних дослідів. При цьому враховувалась та обставина, що на основі експериментальних даних в кінцевому висновку передбачалось отримати залежності для опису величин коефіцієнтів прилипання ( $a$ ) і відриву ( $\beta$ ) частинок забруднень від матеріалу завантаження, в тому числі їх залежність від швидкості фільтрування. Правильне їх визначення дозволить досить точно розрахувати основні характеристики швидких фільтрів.

В роботі дослідники звичайно використовують плани двох типів: послідовні і випадкові. Якщо взяти верхнє або нижнє значення вимірюваної величини і потім стрибкоподібно збільшувати або зменшувати його, поки не прийдемо до протилежного – такий план називають послідовним. Якщо вибрані значення змінювати (вибирати випадково, тобто брати то більше то менше значення – план називається випадковим (рандомізованим).

Для роботи нами прийнято факторний план проведення досліджень. Основною перевагою факторних експериментів є те, що у цьому випадку для

побудови експериментальної кривої використовується вся сукупність даних і тому точність результатів максимальна.

В теорії планування експериментів фактором називають незалежну змінну, яка може слугувати одним з можливих способів впливу експериментатора на об'єкт досліджень. В принципі, будь-яка досліджувана реальна система може піддаватися необмеженій множині впливів. При виборі факторів для планування експерименту слід виділити групу основних керованих незалежних впливів.

Аналіз робочої гіпотези і існуючих матеріалів по роботі швидких фільтрів, що працюють зі змінною швидкістю фільтрування, а також власні дослідження, дозволили зупинитися на трьох основних незалежних керованих факторах, що впливають на поведінку об'єкту дослідження. До них слід віднести: 1) швидкість фільтрування  $V$ ; 2) початкову концентрацію забруднень  $C_0$ ; 3) відносну відстань від початку фільтруючого завантаження до розглядуваного перерізу  $\bar{z} = z/L$ .

Вибрані в експерименті фактори не є взаємозамінними, тобто, можливе встановлення кожного з них на довільному рівні незалежно від інших. Вони також є сумісними і керованими, а це означає, що всі їх комбінації можуть бути здійснені на моделі і підтримуватись необхідний час. Кожен розглянутий фактор має свою обмежену область визначення, тобто, межі, в яких він може варіюватися та набувати певні значення.

Критерієм ефективності або параметром оптимізації у проведених експериментах прийнято значення концентрації забруднень в рідині в кінцевому перерізі фільтра  $C_e$ .

Аналіз вихідних математичних залежностей (2.85), (2.86) показує, що залежність параметра оптимізації  $C_e$  від вибраних факторів  $V$ ,  $C_0$ ,  $z$  може бути описана плавною кривою. Для отримання експериментальної залежності  $C_e = \psi(V, C_0, z)$  досить мати п'ять експериментальних точок. Отже, вибираємо п'ять рівнів варіювання кожного з факторів, які включені у дослідження.

Наступним етапом в плануванні експерименту є вибір інтервалів варіювання та числа рівнів для кожного з факторів. Величина інтервалу варіювання фактору обмежується з одного боку областю визначення (технічні та принципові обмеження), а з іншого – величиною похибки виміру даного фактора. Оскільки інтервал варіювання буде сумірний з похибкою вимірювання, то два сусідніх рівня практично не будуть розрізнятися.

У наших дослідках, враховуючи наявні дані про досліджуване явище, а також приймаючи до уваги можливість проведення досліджень у лабораторних умовах, фактори приймали наступні значення:

$$V_1 = 3,0 \text{ м/год}; V_2 = 6,0 \text{ м/год}; V_3 = 9,0 \text{ м/год}; V_4 = 12,0 \text{ м/год};$$

$$V_5 = 15 \text{ м/год}.$$

$$C_{01} = 25 \text{ мг/л}; C_{02} = 50 \text{ мг/л}; C_{03} = 75 \text{ мг/л}; C_{04} = 100 \text{ мг/л};$$

$$C_{05} = 125 \text{ мг/л}.$$

$$\bar{z}_1 = 0,2; \bar{z}_2 = 0,4; \bar{z}_3 = 0,6; \bar{z}_4 = 0,8; \bar{z}_5 = 1,0.$$

Варто зазначити, що при проведенні експерименту з часом досліджувана система підлягає впливу не тільки трьох основних, розглянутих раніше, регульованих змінних факторів. У процесі роботи можливі незначні коливання температури, вологості середовища, тиску, а також коливання працездатності оператора. Ці нерегульовані (зовнішні) змінні можуть здійснювати певні непрогнозовані впливи на результат експерименту. З метою виключення можливості отримання систематичної помилки, здатної викликати ускладнення при обробці отриманих даних, нами була проведена рандомізація плану досліджень. Іншими словами, виміри виконувались у послідовності, що дозволяє звести до мінімуму вплив зовнішніх змінних.

В якості плану експериментів нами був прийнятий рандомізований збалансований блочний план досліджень за методом латинського квадрата. В латинському квадраті всі зовнішні змінні випадковим чином розподіляються між комбінаціями умов. Латинський квадрат являє собою частковий план, в загальному сімействі так званих факторних експериментів, хоча останній

термін передбачає не тільки рандомізацію умов експерименту, але і аналіз результатів з використанням складних статистичних методів.

Досліджувана функція (2.35), (2.36) належить до класу формул, при дослідженні яких застосування багатofакторного плану можливе [68]. Обладнання та апаратура, що використовується в експерименті, забезпечують реалізацію рандомізованого плану. Рандомізований трьохфакторний збалансований блочний план, що використовується, за методом латинського квадрату при п'яти рівнях варіювання факторів (рис. 3.1), має вигляд:

	$C_{01}$	$C_{02}$	$C_{03}$	$C_{04}$	$C_{05}$
$V_1$	$\bar{z}_1$	$\bar{z}_2$	$\bar{z}_3$	$\bar{z}_4$	$\bar{z}_5$
$V_2$	$\bar{z}_5$	$\bar{z}_1$	$\bar{z}_2$	$\bar{z}_3$	$\bar{z}_4$
$V_3$	$\bar{z}_4$	$\bar{z}_5$	$\bar{z}_1$	$\bar{z}_2$	$\bar{z}_3$
$V_4$	$\bar{z}_3$	$\bar{z}_4$	$\bar{z}_5$	$\bar{z}_1$	$\bar{z}_2$
$V_5$	$\bar{z}_2$	$\bar{z}_3$	$\bar{z}_4$	$\bar{z}_5$	$\bar{z}_1$

Рис. 3.1. Схема блочного плану за методом латинського квадрату

Згідно плану, на установці необхідно провести мінімум 25 дослідів при різних поєднаннях рівнів варіювання факторів.

Однією з визначаючих обставин при розробці і використанні плану експериментів було те, що нами в роботі на базі аналізу вихідної математичної моделі були знайдені аналітичні залежності для визначення, основних характеристик фільтрів. При цьому, не було необхідності в складанні і підборі, з використанням методів математичної статистики, поліномів різного ступеня складності для описання параметрів потоків, які вивчаються.

Підводячи підсумок слід зазначити, що математичні методи теорії планування експерименту повинні розумно поєднуватись з традиційним класичним методом дослідження, сприяючи при цьому підвищенню



продуктивності праці та якості дослідницьких розробок. Цим принципом ми і керувались при проведенні представлених експериментальних досліджень.

### **3.4. Експериментальна установка та методика проведення досліджень**

Для проведення експериментальних досліджень в лабораторії кафедри водопостачання та водовідведення Київського національного університету будівництва і архітектури була змонтована дослідна установка, схема якої приведена на рис. 3.2.

Установка працювала наступним чином. Водопровідна вода подавалася трубопроводом (1) в бак приготування суспензії (2), відповідна концентрація якої досягалась шляхом розведення спондилової глини у воді, перемішування суміші здійснювалось за допомогою механічної мішалки (3). Після баку суспензія за допомогою насоса (6) направлялася у розташований над фільтрувальною колоною витратний бак (8). Постійний рівень води в цьому баку, який забезпечував постійну (задану) витрату води, підтримувався за допомогою окремого переливного трубопроводу (9). З витратного баку суспензія надходила до фільтрувальної колони (12), попередньо проходячи через розсіювальний пристрій (11). На фільтрування рідина подавалася з постійною витратою, величина якої регулювалася запірною арматурою на подавальному трубопроводі (10). Після проходження фільтрувального шару завантаження (14) очищена вода надходила до дренажу – щілинного ковпачку (18), після чого через відвідний трубопровід (19) відводилась в систему водовідведення, для промивки фільтруючого завантаження використовувався трубопровід (20).

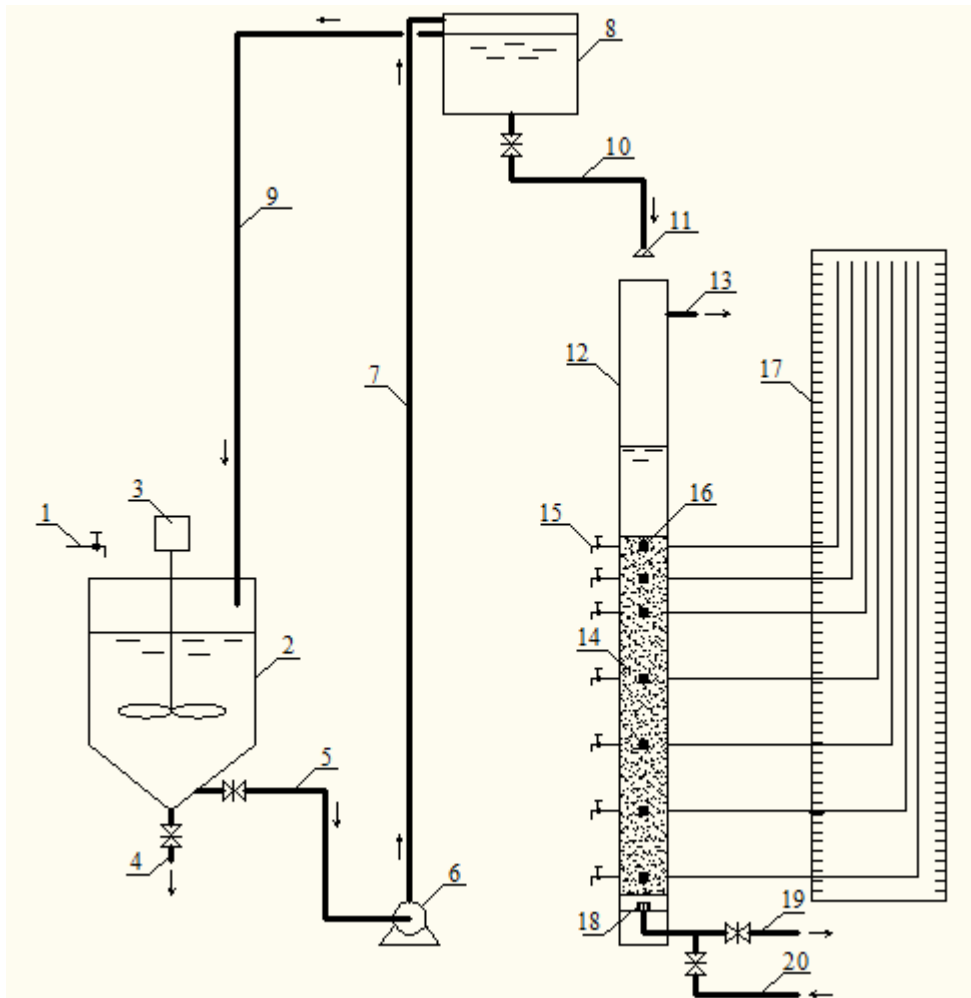


Рис. 3.2. Схема експериментальної установки:

- 1 – подача води з водопровідної мережі; 2 – бак для приготування суспензії;  
 3 – механічна мішалка; 4 – випуск в каналізацію; 5 – трубопровід подачі суспензії до насоса; 6 – насос; 7 – напірний трубопровід подачі суспензії до витратного баку; 8 – витратний бак; 9 – переливний трубопровід;  
 10 – трубопровід подачі суспензії на фільтр; 11 – розподільчий оголовок;  
 12 – фільтрувальна установка; 13 – переливний трубопровід; 14 – фільтруюче завантаження; 15 - крани для відбору проб суспензії; 16 – місце для відбору проб завантаження; 17 – щит п'езометрів; 18 – дренажний ковпачок;  
 19 – трубопровід відводу очищеної води; 20 – трубопровід подачі води на промивку

Фільтрувальна колона була виготовлена з труби ПВХ Ø150 мм висотою 2 м [57]. Верх залишався відкритим, низ герметично закритий. Висота шару завантаження піску (14) становила 1,0 м. На трубі обладнано 7 створів (1, 2, 3 – на відстані 0,1 м, 4, 5, 6, 7 – через 0,2 м), в яких відбувався відбір води, що очищала (15), і проб піску (16) після процесу фільтрування. В цих же створах

було підключено спеціальні п'єзометричні трубки (17) для отримання показань напору у відповідних перерізах фільтруючого завантаження.

Вода на очистку надходила у надфільтровий простір фільтру і рухалась через шар фільтруючого завантаження згори до низу. В якості фільтруючого завантаження було прийнято кварцовий пісок, аналогічний тому, що використовується на Дніпровській водопровідній станції м. Києва. Після закінчення фільтроциклу фільтр промивали. Для цього закривали запірну арматуру на трубопроводі подачі суспензії (10) та відведення очищеної води (19) і відкривали арматуру на трубопроводі промивної води (20). Промивна вода рухалася у зворотному напрямку, тобто знизу вгору, шар фільтруючого завантаження розширювався і починав “кипіти”, забруднення вимивалися з нього і по переливному трубопроводу (13) виносились в каналізацію. Після закінчення промивки відмитий пісок завантаження осідав у фільтраційній колоні і починався новий дослід.

При проведенні експериментальних досліджень використовувалось таке обладнання: лабораторні електронні ваги з ціною поділки 1 мг; фотоколориметр КФК-2; посуд мірний лабораторний скляний: піпетки 10 мл, 25 мл, колби мірні місткістю 100 мл, 500 мл, 1000 мл; секундомір з ціною поділки 0,2 с; мірна лінійка з ціною поділки 1 мм.

### **Методика проведення і обробки результатів експериментальних досліджень**

При проведенні експериментальних досліджень вимірювались витрата фільтрованої води і втрати напору у фільтруючому завантаженні. Останні вимірювались за допомогою ряду встановлених п'єзометрів, закріплених на спеціальному щиті. Всі п'єзометри були обладнані мірною лінійкою з ціною поділки 1 мм. П'єзометричну позначку, а отже і втрати напору визначали з точністю до 0,5 мм. Одночасно визначалась глибина шару води над фільтруючим завантаженням. Довжину шляху фільтрування, тобто товщину

фільтрувального завантаження між точками підключення п'єзометрів до фільтру також вимірювали за допомогою вимірювальної лінійки.

Окрім визначення гідравлічних характеристик потоку в ході експерименту в усіх створах і на виході з установки за допомогою спеціальних кранів (15) відбирались проби суспензії об'ємом 10 – 20 мл, в яких за допомогою фотоколориметру КФК - 2 проводилось вимірювання концентрації завислих речовин.

Важливим етапом при проведенні дослідів було визначення концентрації забруднень, які були затримані у піщаному завантаженні при роботі фільтрувальної установки. Для цього за допомогою спеціальних патрубків (16) паралельно з пробами води відбирались проби фільтруючого піску об'ємом 5 см<sup>3</sup>. Далі вони відмивались у чистій воді і вже в ній визначалась концентрація затриманих забруднень. Забір проб фільтрованої води та піску здійснювався кожну годину. При цьому фіксувалась динаміка зміни їх показників протягом часу.

Окрема серія дослідів проводилась для визначення відношення концентрації осаду та твердих частинок у ньому ( $\gamma$ ). Для цього фільтрувальна установка працювала одну годину при швидкостях фільтрування 6 – 12 м/год, початковій концентрації завислих речовин 50 – 100 мг/л. Показання п'єзометрів і проби піску знімалися кожні 10 хв. Відбір проб піску здійснювався також за допомогою патрубків (16). Після того як вода з колб зливалась у кюветку для визначення вмісту завислих речовин у ній, пісок, що залишався в колбі, ретельно відмивався від забруднень чистою водою та висушувався в печі. Висушений пісок зважувався, також визначався його об'єм шляхом опускання у мірну колбу з водою.

Об'єм проб води і піску, що відбиралися в ході експерименту, становив менше, відповідно, 5% і 1% від об'єму фільтруемого і фільтрувального середовища, що у відповідності з рекомендаціями [38], суттєво не впливало на параметри модельного потоку і їх впливом можна знехтувати.

Закінчення роботи експериментальної фільтрувальної установки в конкретному досліді, а отже тривалість фільтроциклу відбувалось при досягненні певної визначеної концентрації забруднень на виході з фільтрувальної колони, або заданої глибини шару води над фільтруючим завантаженням.

Порівняно проста схема дозволила проводити експерименти в широкому діапазоні зміни параметрів фільтрування.

Витрату води, яка надходила на фільтр, визначали об'ємним способом за допомогою мірної колби об'ємом  $1\text{дм}^3$  та секундоміру з ціною поділки  $0,2\text{с}$  за формулою:

$$Q_i = \frac{W_i}{t_i}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (3.6)$$

де  $W_i$  – об'єм води, яка надходить на фільтр за  $i$ -ий цикл вимірювань,  $\text{м}^3$ ;  $t_i$  – тривалість  $i$ -го циклу роботи лабораторної установки, год.

При цьому точність вимірювань становила:  $W_i - 0,000001 \text{ м}^3$ ;  $t_i - 0,2 \text{ с}$ .

Швидкість фільтрування розраховувалась за залежністю:

$$V_i = \frac{4Q_i}{\pi d_\phi^2}, \text{ м}/\text{год}, \quad (3.7)$$

тут  $d_\phi$  – діаметр фільтраційної колони, м.

Значення  $V_i$  визначалась з точністю  $0,1 \text{ м}/\text{год}$ .

### **Визначення насипної густини піску**

Насипну густину піску в стандартному неущільненому стані визначали зважуванням проби матеріалу, висушеної до постійної маси і просіяної крізь сито з круглими отворами діаметром  $5 \text{ мм}$ , в мірній циліндричній металевій посудині об'ємом  $1 \text{ л}$ .

При визначенні насипної густини піску в стандартному не ущільненому стані пісок насипають у попередньо зважений металевий циліндр з висоти  $100 \text{ мм}$  від верхнього краю до утворення конуса, який потім знімають в рівень з

краями посудини металевою лінійкою, після чого посудину з піском зважують.

Насипну густину ( $\rho_n$ ) в г/см<sup>3</sup> розраховували за формулою:

$$\rho_n = \frac{m_1 - m}{V} = \frac{1612 - 200}{1000} = 1,412 \text{ г/см}^3, \quad (3.8)$$

де  $m$  – маса мірної посудини, г;  $m_1$  – маса мірної посудини з піском, г;  $V$  – об'єм мірної посудини, см<sup>3</sup>.

### **Визначення істинної густини піску**

Істинну густину твердих матеріалів визначали за допомогою приладу Ле Шательє. Колбу заповнювали до нульової позначки водою, яка є рідиною інертною до досліджуваного матеріалу і зважували. Рівень рідини в колбі визначали за нижнім меніском. Кварцовий пісок висушували до сталої маси і всипали через лійку невеликими порціями у колбу доти, доки рівень рідини у приладі піднімався до однієї з верхніх поділок. Потім колбу знову зважували.

Істинну густину проби ( $\rho_i$ ) в г/см<sup>3</sup> визначали за формулою:

$$\rho_i = \frac{m_1 - m_2}{V} = \frac{443 - 390}{200} = 2,65, \text{ г/см}^3, \quad (3.9)$$

де  $m_1$  – маса колби після засипання піску, г;  $m_2$  – маса колби до засипання зразку, г;  $V$  – об'єм піску рівний об'єму виштовхнутої рідини, см<sup>3</sup>.

### **Визначення пустотності (пористості) завантаження**

Пустотність (пористість) визначали за формулою:

$$P = n = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_i}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1412}{2650}\right) \cdot 100\% = 47\%. \quad (3.10)$$

### **Визначення зернового складу і модуля крупності піску**

Зерновий (гранулометричний) склад піску характеризується відносним (відсотковим) вмістом у ньому зерен різних розмірів. Його визначали шляхом розсіювання висушеної до постійної маси проби піску на стандартному наборі

сит (ситовий метод) [46, 86]. Із проби піску, який пройшов крізь сито з отворами діаметром 5 мм, відбирали наважку масою (не менше) 1000 г для визначення зернового складу піску. Підготовлену наважку піску просіювали ручним способом крізь набір сит з круглими отворами діаметром 2,5 мм та сітками № 1,25; 0,63; 0,315 і 0,16. Просіювання вважали закінченим, коли при контрольному ручному струшуванні кожного сита протягом 1 хв крізь сито проходило не більше 0,1% від загальної маси наважки. При ручному просіюванні допускається визначати закінчення просіювання, інтенсивно струшуючи кожне сито над аркушем паперу. В цьому випадку просіювання вважають закінченим, якщо практично не спостерігається падіння зерен піску. Залишки піску на кожному ситі зважували. За результатами просіювання розраховували:

- частковий залишок на кожному ситі ( $\alpha_i$ ) у відсотках за формулою:

$$\alpha_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100\% \quad (3.11)$$

де  $m_i$  – маса залишку на даному ситі, г;  $m$  – маса піску, що просіюється, г;

- повний залишок на кожному ситі ( $A_i$ ) у відсотках, визначали як суму часткових залишків на всіх ситах із більшим розміром отворів з урахуванням залишку на даному ситі за формулою:

$$A_i = \alpha_{2,5} + \alpha_{1,25} + \dots + \alpha_i, \quad (3.12)$$

де  $\alpha_{2,5}, \alpha_{1,25}, \dots, \alpha_i$  – часткові залишки на відповідних ситах, %;

- модуль крупності піску ( $M_k$ ) без урахування зерен розмірами більше 5 мм за залежністю:

$$M_k = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}}{100}, \quad (3.13)$$

де  $A_{2,5}, A_{1,25}, A_{0,63}, A_{0,315}, A_{0,16}$  – повні залишки на ситах з отворами розміром 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,16 мм, %.

Результати розрахунку занесені до таблиці, а також представлені графічно у вигляді кривої просіювання (рис. 3.3).

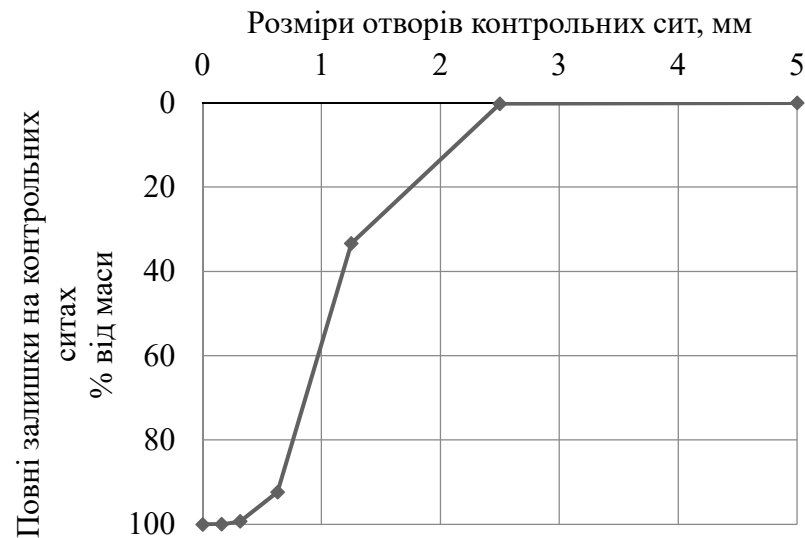


Рис.3.3. Крива зернового складу піску

Таблиця 3.1

## Результати визначення зернового складу піску

Показник	Розміри отворів сит, мм					Пройшло крізь сито з розмірами отворів 0,16 мм, мас.%
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
Маса залишку на ситі $m_i$ , г	1,98	331,28	590,31	69,27	7,15	1,12
Частковий Залишок $\alpha_i$ , мас.%	0,2	33,12	59,03	6,93	0,71	0,1
Повний залишок $A_i$ , мас.%	0,2	33,32	92,35	99,28	99,99	100

$$M_k = \frac{0,2 + 33,32 + 92,35 + 99,28 + 99,99}{100} = 3,25. \quad (3.14)$$

**Визначення еквівалентного діаметра часток піску**

Еквівалентний діаметр частки – це діаметр сфери з об'ємом, рівним об'єму цієї частки. При його визначенні також використовували прилад Ле Шательє. Колбу заповнювали до нульової позначки водою. Засипаний в колбу кварцовий пісок висушували до сталої маси, відраховували 2000 часток і



всипали їх через лійку невеликими порціями у колбу. Потім за шкалою на колбі визначали об'єм, який зайняли ці частки ( $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ).

Об'єм, який зайняли засипані 2000 часток піску, розраховували за формулою:

$$W = \frac{\pi D_{\text{екв}}^3}{6} \cdot 2000, \quad (3.15)$$

де  $D_{\text{екв}}$  – еквівалентний діаметр, м.

Звідси, еквівалентний діаметр частки буде:

$$D_{\text{екв}} = \sqrt[3]{\frac{6W}{\pi \cdot 2000}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 2000}} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (3.16)$$

Середнє значення коефіцієнта форми частинок піску становило  $k_{\phi}=1,19$ .

### **Результати дослідження за допомогою рентгенофазового аналізу**

У представлений роботі було проведено дослідження зразків немитого та відмитого піску за допомогою рентгенофазового аналізу. Рентгенофазовий аналіз – метод дослідження структурних характеристик матеріалу за допомогою дифракції рентгенівських променів на порошку або полікристалічному зразку досліджуваного матеріалу. Метою рентгенофазового аналізу є ідентифікація речовини в суміші за набором її міжплощинних відстаней ( $d$ ) і відносними інтенсивностями ( $I$ ) відповідних ліній на рентгенограмі. Для цього, згідно закону Брегга – Вульфа [97], необхідно визначити кути відбиття ( $\theta$ ). Результатом дослідження є залежність інтенсивності розсіяного випромінювання від кута розсіювання. Було застосовано метод порошку (попередньо досліджуваний пісок розтирався до стану порошку), бо він є найбільш розповсюдженим на практиці завдяки його простоті і універсальності.

Згідно з даними рентгенофазового аналізу у досліджуваному зразку переважає кварц ( $d = 4,230; 3,363; 2,461; 2,281; 2,127; 1,974; 1,824; 1,542; 1,379; 1,379$ ) з домішками альбіту ( $d = 3,952; 3,617; 3,243; 3,156; 3,01; 2,931; 2,243$ ). Також наявні незначні включення тридиміту ( $d = 3,739; 1,642$ ), кальциту ( $d =$

1,542) та олігоклазу ( $d = 2,461$ ). Діаграма рентгенофазового аналізу наведена в додатку Б.

### **Визначення середнього діаметру частинок спондилової глини**

Для цього досліджувану глину подрібнювали до стану порошку. Визначення середнього розміру частинок здійснювалось за допомогою приладу ПСХ-2. За результатами проведених вимірювань було встановлено, що середній діаметр частинок глини становить  $d_{сер} = 0,0000077 \text{ м} = 7,7 \text{ мкм}$ .

### **Визначення величини коефіцієнтів прилипання ( $\alpha$ ) і відриву ( $\beta$ )**

Для визначення коефіцієнта швидкості прилипання частинок забруднень до фільтруючого завантаження фільтра ( $\alpha$ ) використаємо вихідне рівняння (2.36), яке описує кінетику видалення забруднень при фільтрації, у вигляді

$$-V \frac{\partial C}{\partial z} = \alpha C - \beta S. \quad (3.17)$$

В початковий період роботи у фільтрі відбувається тільки видалення і накопичення забруднень, а відрив частинок забруднень практично відсутній. Тобто, для цього часу другим членом в правій частині рівняння (3.17) можна знехтувати. Тоді воно прийме вигляд

$$V \frac{\partial C}{\partial z} = -\alpha C. \quad (3.18)$$

Розв'язок (3.18) при граничних умовах:  $z = 0$ ;  $C = C_0$ , дає

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{\alpha}{V} z, \quad (3.19)$$

де  $C_0$  – концентрація забруднень в початковому перерізі фільтра;  $C$  – концентрація забруднень у перерізі на висоті фільтра  $z$ .

З останньої залежності знаходимо:

$$\alpha = -\frac{V}{z} \ln \frac{C}{C_0}. \quad (3.20)$$

Для визначення коефіцієнта швидкості відриву  $\beta$  використаємо співвідношення

$$\frac{S_{02}}{S_{01}} = \frac{1 - e^{-\beta t_2}}{1 - e^{-\beta t_1}}, \quad (3.21)$$

де  $S_1, S_2$  – концентрації забруднень, які затримались у фільтрі, за час роботи, відповідно,  $t_1$  і  $t_2$ .

Порядок розрахунку показників степені  $l$  і  $q$  в залежностях (2.38) наступний. В результаті проведення основного об'єму експериментальних досліджень при різних швидкостях фільтрування з використанням приведеної вище методики нами визначені величини коефіцієнтів швидкості  $a$  і  $\beta$ .

Позначимо  $a_1$  і  $\beta_1$  їх значення при швидкості фільтрування  $V_1$ ;  $a_2$  і  $\beta_2$  при швидкості фільтрування  $V_2$  і т.д.;  $a_j$  і  $\beta_j$  при швидкості  $V_j$ . Підставивши їх у співвідношення (2.38), отримаємо:

$$\alpha_1 = \alpha_v V_1^l, \quad \alpha_2 = \alpha_v V_2^l, \quad \dots, \quad \alpha_j = \alpha_v V_j^l. \quad (3.22)$$

Розділивши всі отримані вирази (3.22), крім першого, на величину першого члена, будемо мати:

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^l, \quad \dots, \quad \frac{\alpha_j}{\alpha_1} = \left(\frac{V_j}{V_1}\right)^l. \quad (3.23)$$

Звідси показник степені  $l$  буде:

$$l = \frac{\ln(\alpha_2 / \alpha_1)}{\ln(V_2 / V_1)} = \dots = \frac{\ln(\alpha_j / \alpha_1)}{\ln(V_j / V_1)}. \quad (3.24)$$

За розрахованими значеннями показника степені  $l$  методом найменших квадратів знаходиться його осереднене значення  $l_{сер}$  для всіх значень швидкості.

Аналогічний підхід використовувався при визначенні показника степені  $q$ . За результатами експериментів, при швидкостях фільтрування  $V_1, V_2, \dots, V_j$ , відомі відповідні значення приведених параметрів  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$ . Далі отримаємо:

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^q, \dots, \frac{\beta_j}{\beta_1} = \left(\frac{V_j}{V_1}\right)^q. \quad (3.25)$$

Тоді показник степені  $q$  визначиться із співвідношення:

$$q = \frac{\ln(\beta_2 / \beta_1)}{\ln(V_2 / V_1)} = \dots = \frac{\ln(\beta_j / \beta_1)}{\ln(V_j / V_1)}. \quad (3.26)$$

Як і в попередньому випадку, за методом найменших квадратів визначається середнє для всіх швидкостей значення показника степені  $q_{сер}$ . Підставивши у вирази (3.22) значення  $l_{сер}$ , знаходяться відповідні величини приведених коефіцієнтів  $\alpha_V$ , отримаємо:

$$\alpha_{V1} = \frac{\alpha_1}{V_1^{l_{сер}}}, \quad \alpha_{V2} = \frac{\alpha_2}{V_2^{l_{сер}}}, \quad \dots, \quad \alpha_{Vj} = \frac{\alpha_j}{V_j^{l_{сер}}}. \quad (3.27)$$

Знову, використовуючи метод найменших квадратів, визначається середнє для всіх швидкостей значення приведенного коефіцієнта  $\alpha_{Vсер}$ .

Використавши значення  $q_{сер}$ , знаходяться величини приведених коефіцієнтів  $\beta_V$ , і їх середнє значення  $\beta_{Vсер}$ , будемо мати:

$$\beta_{V1} = \frac{\beta_1}{V_1^{q_{сер}}}, \quad \beta_{V2} = \frac{\beta_2}{V_2^{q_{сер}}}, \quad \dots, \quad \beta_{Vj} = \frac{\beta_j}{V_j^{q_{сер}}}. \quad (3.28)$$

### 3.5. Математична обробка результатів досліджень

Точність проведених експериментальних досліджень визначається умовами виконання дослідів та залежить від точності спостережень по шкалі приладів та вимірювальних засобів. Оцінка похибки результатів вимірів та перевірка адекватності теоретичних залежностей експерименту здійснювалась за методикою, яка детально викладеною в роботі [98].

Шукане значення вимірюваної величини визначалось як середнє арифметичне (математичне очікування) (зокрема значення вимірюваної витрати знаходилось як середня величина від мінімум чотирьох незалежних замірів)

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (3.29)$$

де  $y_i$  – результати вимірів в одній і тій самій точці;  $n$  – число вимірів.

Абсолютна похибка і-го виміру:

$$\pm \delta = \bar{y} - y_i. \quad (3.30)$$

Відносна похибка і-го виміру (у відсотках):

$$\varepsilon_i = \pm \frac{\delta}{\bar{y}} 100\%. \quad (3.31)$$

Дисперсія вимірів:

$$D_y = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}. \quad (3.32)$$

Як відомо, середнє арифметичне характеризує результат дослідів, а дисперсія – точність цього результату.

Середньоквадратичне відхилення (середньоквадратична похибка):

$$\sigma = D_y^{0.5}. \quad (3.33)$$

Величина середньої похибки (середнє арифметичне значення середньоквадратичного відхилення):

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{\bar{y}}}. \quad (3.34)$$

Відносна похибка результатів серії вимірювань (у відсотках):

$$\varepsilon = \pm \frac{\sigma_0 \alpha_{cm}}{\bar{y}}, \quad (3.35)$$

де  $\alpha_{cm}$  – коефіцієнт Стюдента, який визначається за таблицею [98], в залежності від величини довірчої ймовірності  $\Phi_{cm} = 0,95$  і кількості вимірів  $n$ .

Точність вимірів: 
$$\eta = \frac{\sigma_0}{\bar{y}}. \quad (3.36)$$

У випадку, коли фізична величина  $y$  є функцією кількох незалежних змінних, тобто

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (3.37)$$

то граничні абсолютна ( $\delta$ ) і відносна ( $\varepsilon$ ) похибки функції визначалися за відповідними залежностями

$$\delta_{zp} = \pm \left( \left| \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)}{\partial x_1} dx_1 \right| + \left| \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)}{\partial x_2} dx_2 \right| + \left| \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)}{\partial x_3} dx_3 \right| + \dots + \left| \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)}{\partial x_n} dx_n \right| \right), \quad (3.38)$$

$$\varepsilon_{zp} = \pm d \ln(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (3.39)$$

Тобто, гранична абсолютна похибка функції кількох незалежних змінних визначається сумою абсолютних величин всіх часткових диференціалів цієї функції, а гранична відносна похибка дорівнює диференціалу її натурального логарифма.

Дисперсія довільної функції має вигляд

$$D_r^2 = \left( \frac{\partial R}{\partial x_c} \right)_y D_x^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial y_c} \right)_x D_y^2, \quad (3.40)$$

тут  $D_x^2, D_y^2$  – дисперсії похибок вимірів окремих величин;  $x_c, y_c$  – середні значення відповідних вимірів;  $R$  – розрахункова функціональна математична залежність.

Для того, щоб мати можливість прийняти рішення про доцільність практичного використання аналітично отриманих моделей, що описують процес видалення забруднень при фільтрації рідини на швидких фільтрах, треба середні значення виміряних в дослідах величин, які розраховані за формулою (3.29), оцінити на їх “якість”, тобто співставити похибки, які отримані при їх використанні, з похибками досліду. Чим меншою буде різниця між ними, тим надійніша розроблена математична модель. Для цього необхідно перевірити отримані результати експериментальних досліджень на відтворюваність і адекватність (відповідність).

Відтворюваність результатів експериментів, тобто можливість їх повторення в певних межах вимірів із заданим ступенем довірчої ймовірності

$\Phi_{cm} = 0,95$ , в роботі здійснювалась за критерієм Кохрена. При цьому, розрахункове значення останнього визначалося за залежністю

$$K_{K_p} = \frac{D_{\max}^2}{\sum_{i=1}^m D_i^2}, \quad (3.41)$$

де  $D_{\max}^2$  – найбільше значення дисперсій із числа розглядуваних паралельних серій  $m$ ;  $\sum_{i=1}^m D_i^2$  – сума всіх дисперсій  $m$  серій дослідів.

Досліди вважалися відтворюваними (дисперсії однорідні) при

$$K_{K_p} \leq K_{K_m}, \quad (3.42)$$

де  $K_{K_m}$  – табличне значення критерія Кохрена, що відповідає довірчій ймовірності  $\Phi_{cm} = 0,95$ , і приймається в залежності від числа паралельних серій дослідів  $m$  і числа степенів свободи  $q = n - 1$ .

В нашому випадку  $K_{K_p} = 0,37 < K_{K_m} = 0,798$ . В проведених дослідях умова (3.42) виконувалась постійно. Це означає, що отримані результати експериментів є відтворюваними.

Перевірка відповідності (адекватності) отриманих аналітичних залежностей даним експерименту здійснювалась за допомогою величини відхилень, що виникають при розрахунку функції, яка визначається, за вихідним рівнянням і даними експерименту, осередненими за числом повторів дослідів в точках факторного простору. Оцінка відхилень виконувалась за критерієм Фішера

$$K_{\Phi_p} = \frac{D_{ad}^2}{D_{відмс}^2}. \quad (3.43)$$

Дисперсія адекватності при цьому знаходилась за формулою

$$D_{ad}^2 = \frac{1}{n-b} \sum_{i=1}^n m_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (3.44)$$

де  $m_i$  – тчисло паралельних дослідів в  $i$ -му рядку матриці планування;  $\bar{y}_i$  – середнє арифметичне функції відгуку з  $m$  паралельних дослідів;

$\hat{y}_i$  – значення функції відгуку, яке розраховане за вихідним рівнянням в  $i$ -му досліді;  $b$  – число значимих коефіцієнтів в рівнянні регресії.

Отримані результати експериментів є адекватними процесу, що вивчається, при виконанні умови

$$K_{\Phi_p} \leq K_{\Phi_m}, \quad (3.45)$$

де  $K_{\Phi_m}$  – табличне значення критерію адекватності (Фішера), яке відповідає довірчій ймовірності  $\Phi_{cm} = 0,95$  і числу степенів свободи  $q$ , які визначаються з виразів

$$q_1 = n - b; \quad q_2 = m(n - 1). \quad (3.46)$$

В нашому випадку отримано  $K_{\Phi_p} = 2,17 < K_{\Phi_m} = 3,86$ . Умова (3.45) в проведених дослідях витримувалась постійно. Отже отримані дослідні дані є адекватними прийнятій робочій гіпотезі (отриманій аналітичним шляхом).

В результаті виконаного аналізу встановлено, що точність вимірюваних параметрів знаходилась в межах:

- при визначенні витрати у фільтраційній колоні – до 3%;
- при замірах показань п'єзометрів – до 3%;
- при розрахунку швидкості фільтрування – до 3%;
- при вимірюванні концентрації забруднень за допомогою фотоколориметру КФК-2 – до 8%.

Під час проведення експериментальних досліджень здійснювався постійний контроль за роботою вимірювальних пристроїв шляхом їх щоденного тарування перед початком і по завершенні роботи.

### 3.6. Висновки по розділу 3

1. В даному розділі сформульовано і вирішуються основні задачі, що ставляться при проведенні експериментальних досліджень, які полягають у визначенні закономірностей видалення з води забруднень і накопичення їх у



фільтрувальному завантаженні за висотою фільтра при змінній з часом швидкості фільтрування.

2. На базі існуючих даних і в результаті аналізу математичних моделей, що описують рух води і процес видалення забруднень фільтруючим завантаженням, сформульовано умови і основні положення фізичного і математичного моделювання явищ, які вивчаються. Визначено основні критерії подібності і області їх застосування для випадку напірного руху в зернистому завантаженні.

3. З використанням положень теорії планування експерименту, складена програма проведення досліджень на модельній установці. Визначено параметри робочого обладнання вимірювальних і контрольних приладів, що використовувались при експериментах.

4. На підставі викладеного розроблено порядок проведення конкретних вимірювань на фільтрувальній установці. Визначена послідовність математичної обробки і представлення отриманих даних по виміру концентрації забруднень, втрат напору, розрахунку коефіцієнтів прилипання і відриву частинок забруднень.

5. Оцінено величину і вплив різного роду похибок, що виникають при проведенні експериментів. Прийнято методику перевірки отриманих експериментальних даних на відтворюваність за критерієм Кохрена і на адекватність за критерієм Фішера.

## РОЗДІЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ АНАЛІЗ

#### 4.1. Результати досліджень втрат напору в тілі фільтра

Перед виконанням основних досліджень на змонтованій експериментальній моделі попередньо була проведена окрема серія вимірювань гідравлічних і фільтраційних характеристик фільтруючого матеріалу чистого (незамуленого) завантаження фільтра при пропусканні чистої води [48]. При різних витратах води (швидкостях фільтрування) визначались показання п'єзометрів. Далі за формулою (4.1) розраховувався гідравлічний похил

$$i = \frac{\Delta h}{L}, \quad (4.1)$$

де  $\Delta h$  – різниця в показаннях п'єзометрів, м;  $L = 1$  м - довжина (висота) шару завантаження з піску в колоні.

Результати вимірів приведені на рис. 4.1.

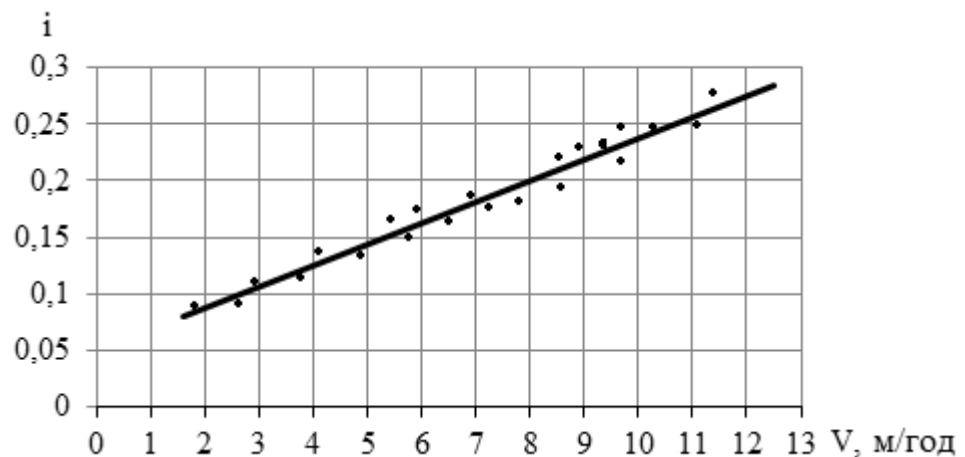


Рис. 4.1. Визначення гідравлічного похилу в чистому завантаженні

Як бачимо, залежність між швидкістю фільтрування і гідравлічним похилом лінійна, що відповідає загальноприйнятій умові про ламінарний режим руху рідини у фільтруючому завантаженні швидких фільтрів при

несуттєвому впливі сил інерції і швидкостях фільтрування  $V < 15$  м/год ( $Re < 4$ ) [38]. Число Рейнольдса при цьому розраховувалось за формулою

$$Re = \frac{Vd_{ек}}{6\nu(1-n_0)}. \quad (4.2)$$

За отриманими даними коефіцієнт фільтрації чистого матеріалу зернистого завантаження визначався за залежністю

$$k_0 = \frac{V}{i}. \quad (4.3)$$

В результаті отримано  $k_0 = 49$  м/год.

Наступна серія проведених експериментальних досліджень була присвячена визначенню зміни втрат напору у фільтрі з часом при пропуску різних витрат води (швидкостях фільтрування) і різних початкових концентраціях забруднень [50, 51]. Окремі типові результати вимірів приведені на рис. 4.2 і 4.3.

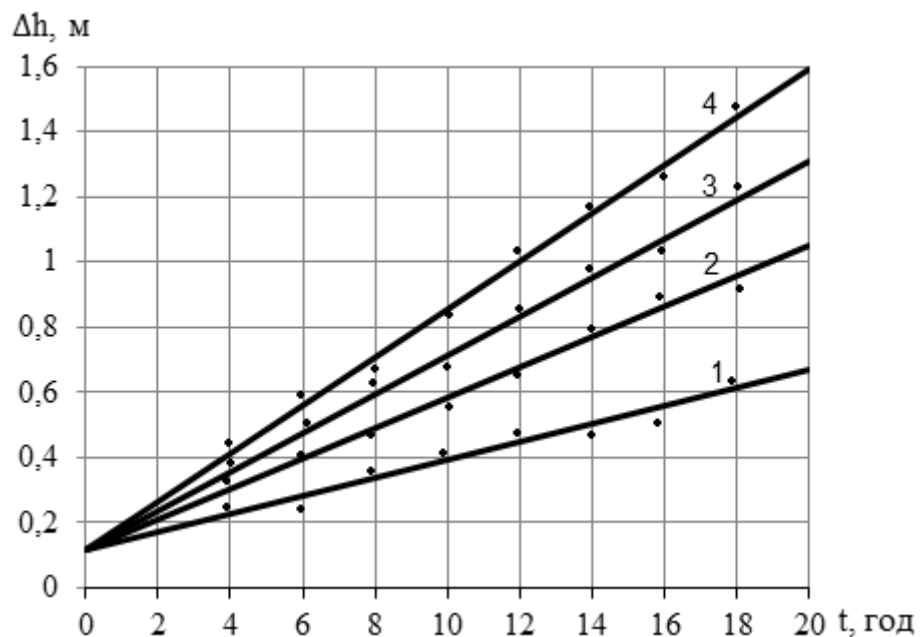


Рис. 4.2. Зміна втрат напору у фільтрі при  $C_0 = 100$  мг/л при швидкості фільтрування: 1.  $V = 3,97$  м/год; 2.  $V = 6,93$  м/год; 3.  $V = 9,99$  м/год; 4.  $V = 12,84$  м/год

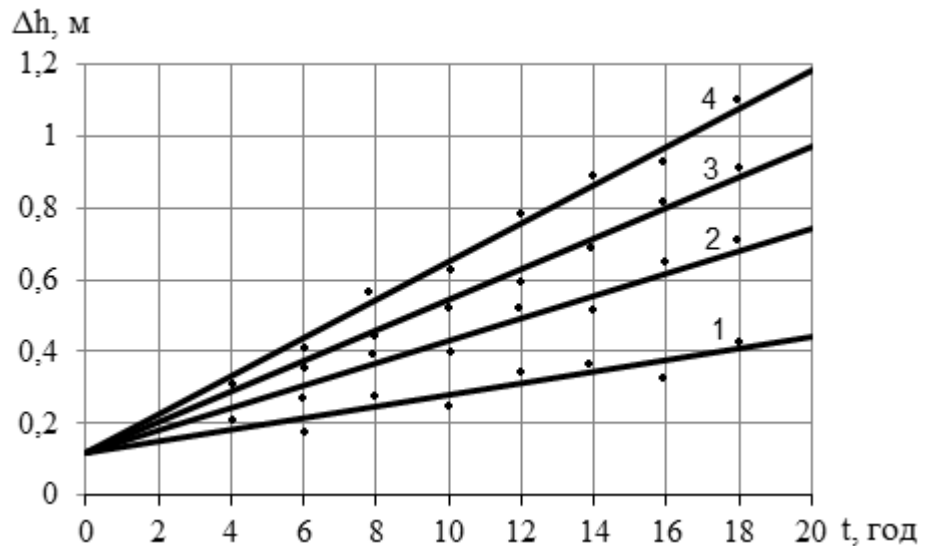


Рис. 4.3. Зміна втрат напору у фільтрі при  $C_0 = 50$  мг/л при швидкості фільтрування: 1.  $V = 4,08$  м/год; 2.  $V = 6,93$  м/год; 3.  $V = 9,78$  м/год; 4.  $V = 13,04$  м/год

На рис. 4.2 і 4.3 представлено характер зміни втрат напору в цілому по всьому фільтруючому завантаженню при початкових концентраціях забруднень  $C_0 = 100$  мг/л і 50 мг/л. З графіків слідує, що підвищення швидкості фільтрування призводить до суттєвого збільшення втрат напору. Також очевидне підвищення втрат напору з часом. Причому, було відмічено їх практично лінійне зростання в усіх досліджуваних випадках, що підтверджує те, що фільтрування суспензії відбувалось при ламінарному режимі руху рідини. Порівняння графіків зміни втрат напору при початкових концентраціях забруднень 100 мг/л і 50 мг/л показує, що збільшення початкової концентрації забруднень в 2 рази призводить до збільшення втрат напору приблизно в 1,7 рази протягом всього розрахункового часу фільтрування.

На рис. 4.4 представлено графік зміни швидкості зростання втрат напору ( $\Delta h/t$ ) з часом для різних початкових концентрацій забруднень при змінній швидкості фільтрування. З нього слідує, що підвищення початкової концентрації забруднень призводить до суттєвого збільшення швидкості зміни втрат напору в завантаженні.

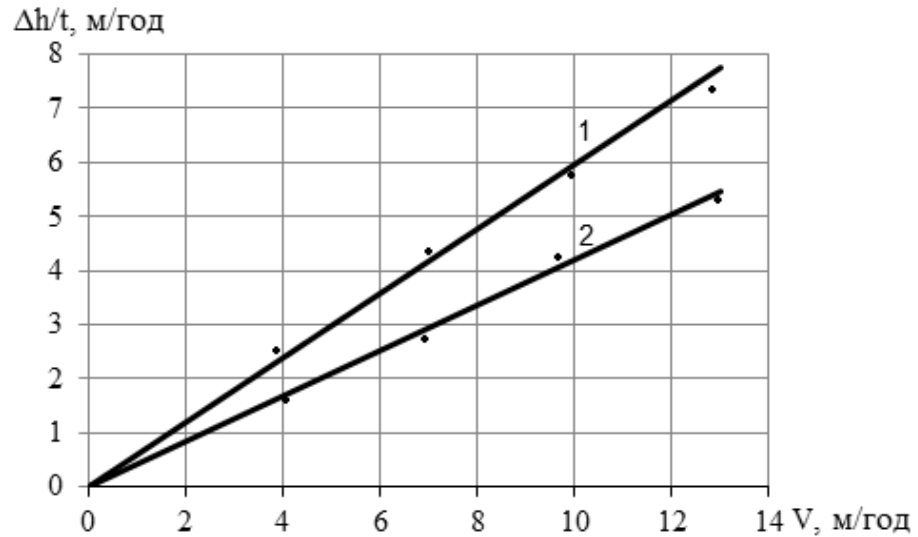


Рис. 4.4. Характеристика зміни швидкості зростання втрат напору з часом: 1.  $C_0 = 100$  мг/л; 2.  $C_0 = 50$  мг/л

На рис. 4.5 представлено графік, який ілюструє співвідношення відносних втрат напору на різних ділянках за висотою фільтруючого завантаження для випадку початкової концентрації забруднень  $C_0 = 50$  мг/л, швидкості фільтрування  $V = 6,93$  м/год в різні години роботи експериментальної установки.

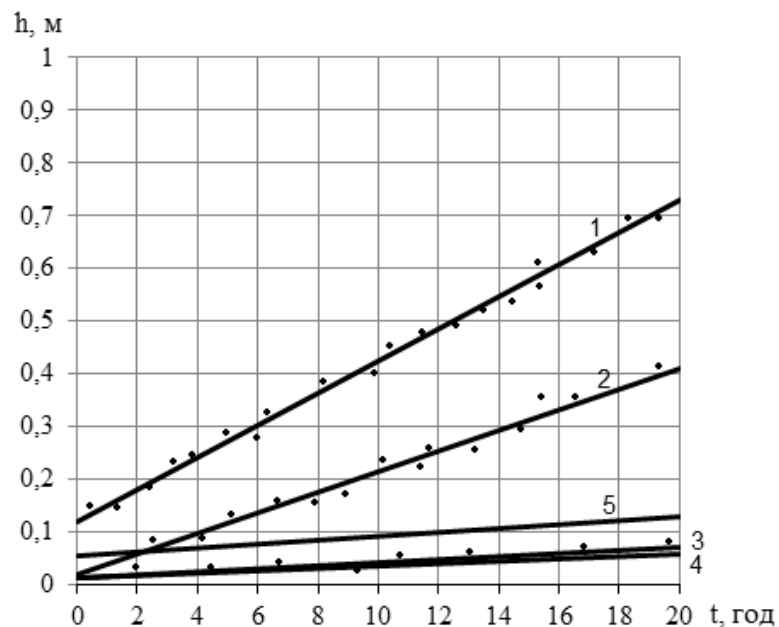


Рис. 4.5. Зміна втрат напору у фільтрі протягом часу:  
 1 – загальні втрати напору по всій висоті фільтра; 2 – втрати напору між створами 1-2 (0,1 м); 3 – втрати напору між створами 2-3 (0,1 м); 4 – те ж саме між створами 3-4 (0,2 м); 5 – те ж саме між створами 4-7 (0,6 м)

Аналіз отриманих даних показує, що протягом всього часу фільтрування основні втрати напору відбуваються у верхніх за напрямком руху води шарах завантаження. В наступних, за товщиною завантаження створах, втрати напору різко зменшуються.

Інформативним і корисним для сприйняття і розуміння закономірностей зміни втрат напору за висотою фільтра є графік на рис. 4.6, на якому показано на якій висоті (глибині) фільтра виникають ті чи інші за величиною втрати напору.

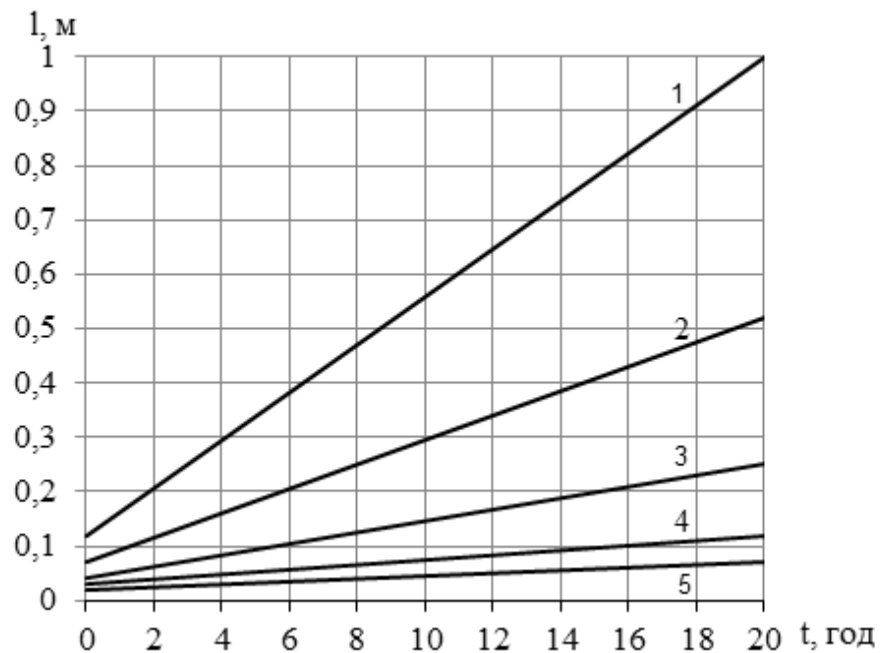


Рис. 4.6. Визначення втрат напору на різних висотах фільтра:  
1 – 100%  $\Delta h$ ; 2 – 90%  $\Delta h$ ; 3 – 80%  $\Delta h$ ; 4 – 70%  $\Delta h$ ; 5 – 50%  $\Delta h$

З нього слідує, що 100% втрат напору досягаються на всій глибині (висоті) фільтра ( $L = 1$  м), 80% втрат напору будуть на глибині  $l = 0,25$  м, 50% – на глибині  $l = 0,07$  м.

Очевидно, що збільшення втрат напору в тілі фільтра викликає збільшення гідравлічного похилу ( $i$ ) при русі рідини через його зернисте завантаження. Останнє відбувається за рахунок накопичення в ньому частинок забруднень. І чим більша концентрація затриманих забруднень в шарі, тим більші втрати напору і гідравлічний похил в ньому.

Аналіз показує, що характер зміни величини гідравлічного похилу в часі при фільтруванні відповідає характеру зміни величини втрат напору на відповідних ділянках фільтруючого завантаження. При необхідності розрахунку гідравлічного похилу при відомому перепаді напорів на визначеній ділянці фільтра слід використовувати формулу (4.1).

Наявність втрат напору в процесі фільтрування в свою чергу призводить до утворення шару води, що очищається, над поверхнею фільтруючого завантаження. З часом, в зв'язку із збільшенням втрат напору, рівень вільної поверхні води над завантаженням зростає. Результати досліджень по визначенню висоти шару води над завантаженням для початкової концентрації забруднень  $C_0 = 50$  мг/л в залежності від швидкості фільтрування приведені на рис. 4.7.

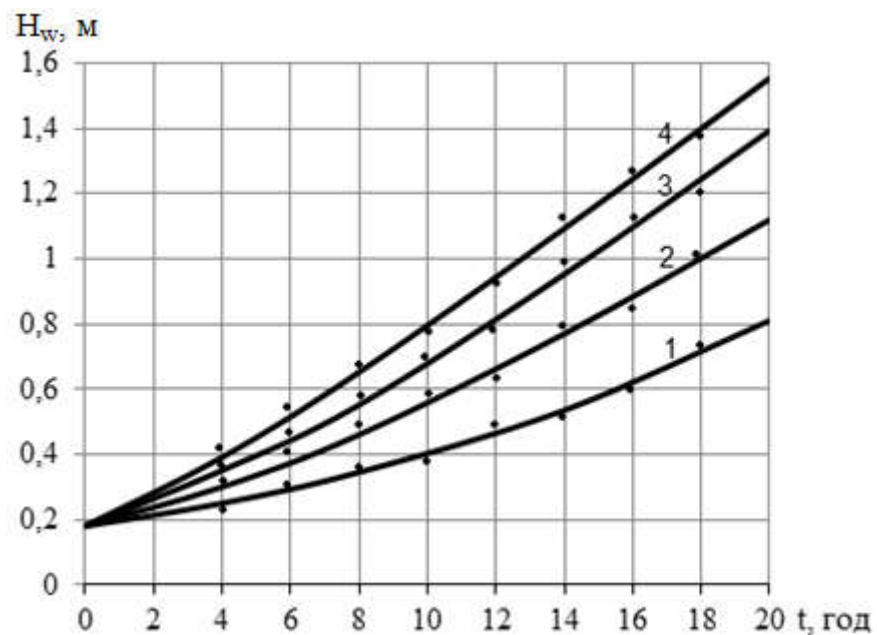


Рис. 4.7. Зміна висоти шару води над завантаженням протягом часу при: 1.  $V = 4,08$  м/год; 2.  $V = 6,93$  м/год; 3.  $V = 9,78$  м/год; 4.  $V = 13,04$  м/год

Даний параметр є дуже важливим, оскільки на практиці відключення фільтру на промивку здійснюється при досягненні певної розрахункової відмітки рівня води над поверхнею зернистого завантаження, яка залежить від конструктивних характеристик споруди.

Важливим узагальненим параметром, який комплексно враховує особливості гідравлічних і фільтраційних характеристик фільтруючого завантаження, може слугувати коефіцієнт фільтрації  $k_f$ . Очевидно, що затримання зернистим завантаженням частинок забруднень призводить до зміни його властивостей і характеристик, в тому числі швидкості фільтрування, втрат напору і коефіцієнта фільтрації.

На рис. 4.8 представлено результати досліджень по вимірюванню зміни з часом відносного середнього для всього завантаження значення коефіцієнта фільтрації ( $\bar{k}_{сер} = k_{сер}/k_0$ ) при різних швидкостях фільтрування і початковій концентрації забруднень  $C_0 = 50$  мг/л.

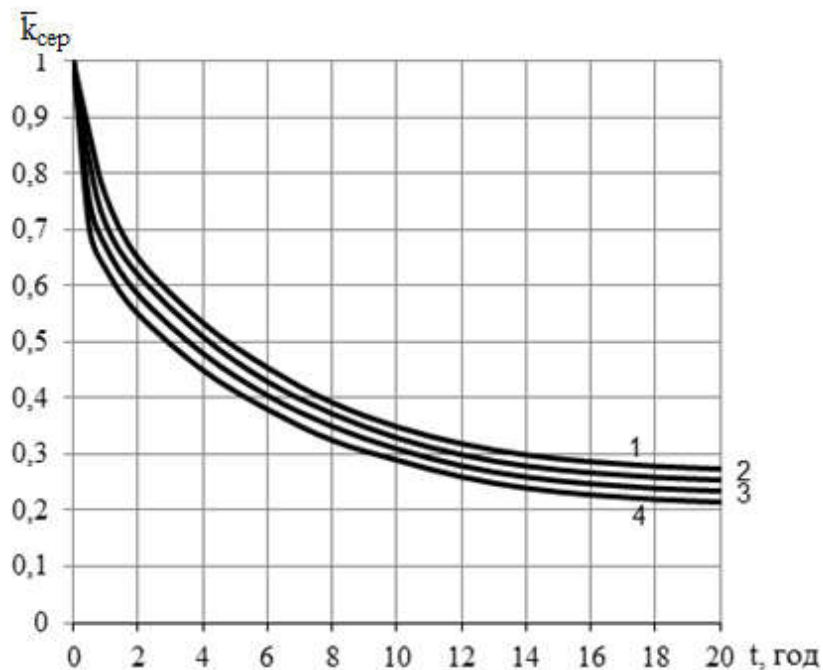


Рис. 4.8. Зміна відносного середнього коефіцієнта фільтрації з часом в залежності від швидкості фільтрування: 1.  $V = 4,08$  м/год; 2.  $V = 6,93$  м/год; 3.  $V = 9,78$  м/год; 4.  $V = 13,04$  м/год

Як слідує з приведених графіків, з часом значення середнього коефіцієнта фільтрації  $\bar{k}_{сер}$  зменшується. Причому, в початковий період роботи фільтра ця зміна відбувається дуже інтенсивно. Близьче до кінця фільтроциклу, при активному насиченні порового простору переважно нижніх шарів завантаження частинками забруднень, значення середнього коефіцієнта



фільтрації змінюється несуттєво. Більш інтенсивно зменшується середній коефіцієнт фільтрації при більшій швидкості фільтрування. Окрім цього слід зазначити, що збільшення початкової концентрації забруднень у воді, яка надходить на фільтр, призводить до зменшення коефіцієнта фільтрації.

При проведенні експериментів також визначався характер зміни коефіцієнта фільтрації з часом за висотою (довжиною) завантаження при різних швидкостях фільтрування і початкових концентраціях забруднень. Як приклад, на рис. 4.9 приведено результати експериментальних досліджень по визначенню змінного за висотою відносного коефіцієнта фільтрації ( $\bar{k} = k/k_0$ ) для випадку початкової концентрації забруднень  $C_0 = 50$  мг/л і швидкості фільтрування  $V = 6.93$  м/год.

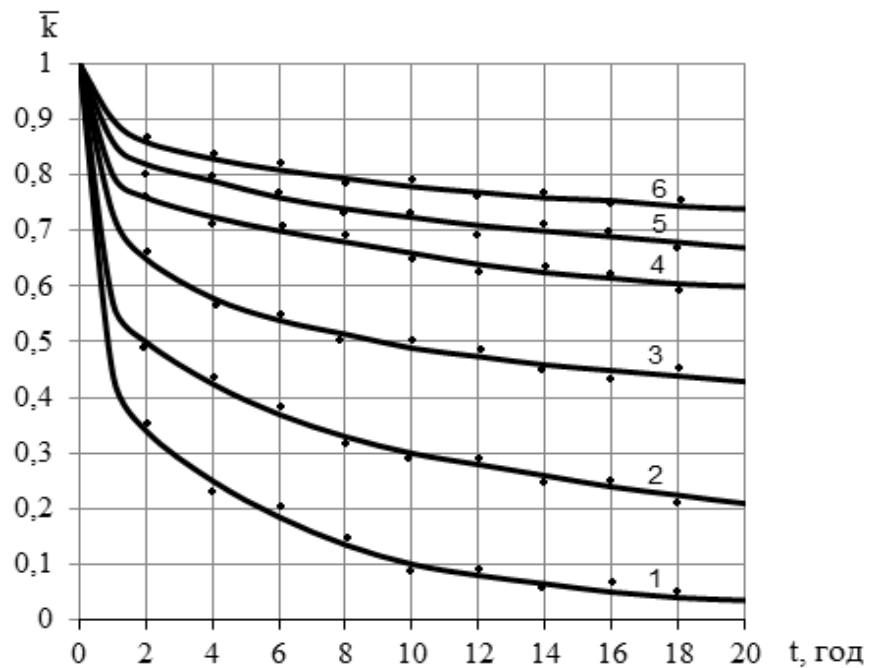


Рис. 4.9. Зміна відносного коефіцієнта фільтрації різних шарів завантаження протягом часу: 1. Між створами 1-2; 2. Між створами 2-3; 3. --- " --- 3-4; 4. --- " --- 4-5; 5. --- " --- 5-6; 6. --- " --- 6-7

Як слідує з графіка, найбільш інтенсивне зменшення коефіцієнта фільтрації за висотою завантаження відбувається в першому створі за рухом рідини, що прояснюється. Чим далі розташований створ від початкового, тим інтенсивність зменшення коефіцієнта фільтрації слабшає. У всіх створах найбільш інтенсивне зменшення відповідного відносного коефіцієнта

фільтрації також має місце в початкові періоди роботи фільтра. З часом ця інтенсивність зменшується і в останньому нижньому шарі завантаження має найменше значення.

Підтвердженням цього висновку можуть служити графіки, які приведені на рис. 4.10, де показано зміну значення відносного коефіцієнта фільтрації ( $\bar{k} = k/k_{\max.}$ ) за глибиною завантаження в різні години роботи дослідної установки ( $k_{\max.}$  – максимальне за висотою завантаження для даного часу роботи фільтра значення коефіцієнта фільтрації).

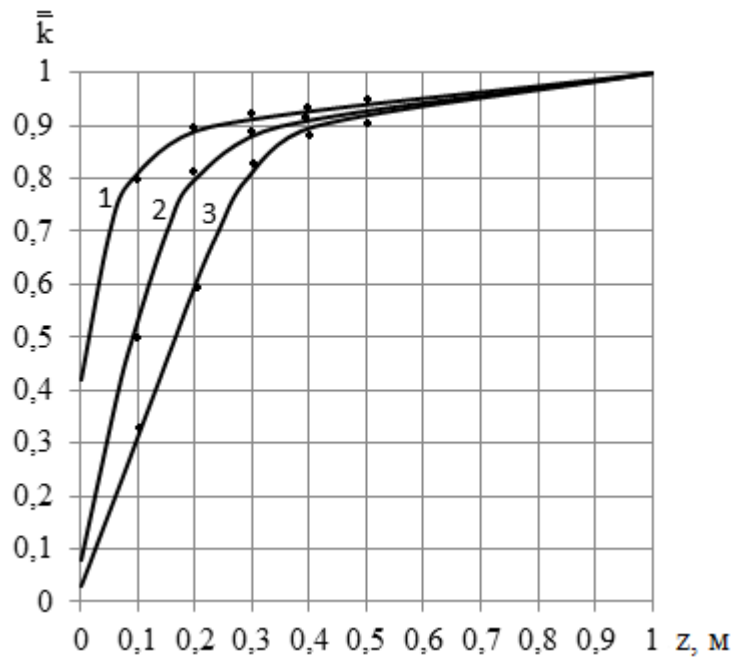


Рис. 4.10. Зміна відносного коефіцієнта фільтрації за глибиною завантаження за час роботи фільтра:  
1.  $t = 3$  год; 2.  $t = 12$  год;  $t = 20$  год

Аналіз графіків на рис. 4.10 також свідчить про те, що максимальне значення коефіцієнта фільтрації в створах за висотою завантаження в різні періоди його роботи знаходиться у нижніх шарах фільтра, мінімальне – у верхніх і, навпаки, максимальні втрати напору мають місце у верхніх шарах фільтра, мінімальні – в нижніх.

## 4.2. Визначення ефекту очистки при різних початкових концентраціях забруднень, швидкостях фільтрування і часу роботи фільтра

Наступним важливим етапом при проведенні представлених досліджень були вимірювання закономірностей зміни концентрації забруднень в часі як в різних перерізах за висотою фільтра, так і в його кінцевому перерізі. При цьому досліди проводились при різних швидкостях фільтрування. Окремі, характерні результати експериментів по вимірюванню зміни концентрації завислих забруднень за висотою (глибиною) фільтра, для випадку концентрації в початковому перерізі  $C_0 = 50$  мг/л, різних швидкостях фільтрування в залежності від часу роботи установки приведені на рис. 4.11 і рис. 4.12.

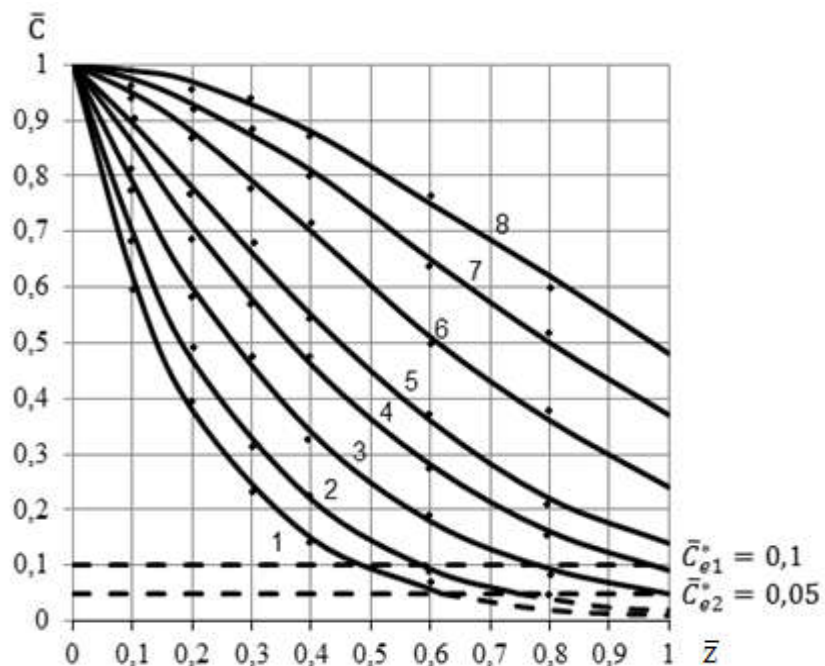


Рис. 4.11. Зміна відносної концентрації забруднень ( $\bar{C} = C/C_0$ ) за висотою фільтра ( $\bar{z} = z/L$ ) при швидкості фільтрування  $V = 4,08$  м/год за час роботи: 1.  $t = 0,5$  год; 2.  $t = 3$  год; 3.  $t = 9$  год; 4.  $t = 15$  год; 5.  $t = 20$  год; 6.  $t = 30$  год; 7.  $t = 40$  год; 8.  $t = 50$  год

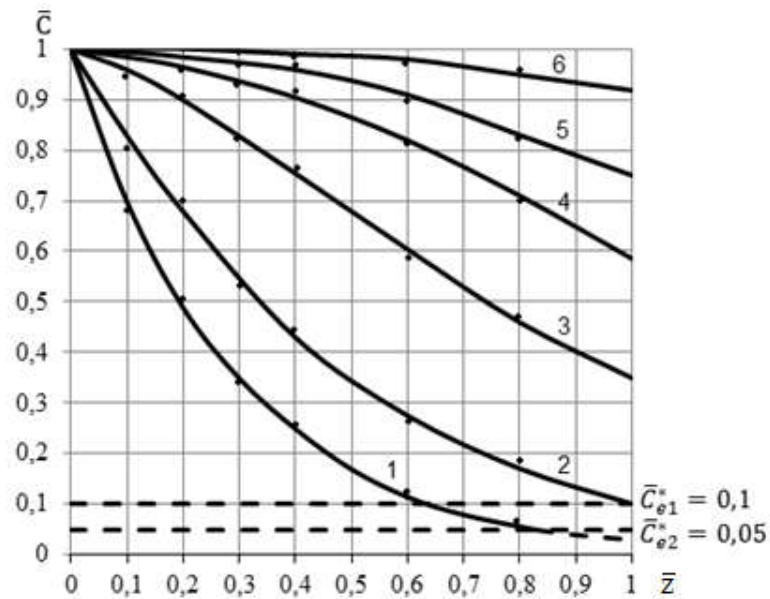


Рис. 4.12. Зміна відносної концентрації забруднень  $\bar{C}$  за висотою фільтра  $\bar{z}$  при швидкості фільтрування  $V = 13,04$  м/год за час роботи: 1.  $t = 0,5$  год; 2.  $t = 3$  год; 3.  $t = 9$  год; 4.  $t = 15$  год; 5.  $t = 20$  год; 6.  $t = 30$  год

З графіків слідує, що максимальний ступінь очистки має місце в початкових перерізах фільтра. З глибиною завантаження він різко зменшується і має мінімальне значення в кінцевих перерізах. Відмічається, що в початкові періоди роботи фільтра максимальне значення ступеня очистки має місце на глибині завантаження до 0,3 м. Протягом певного часу ступінь очистки на початкових ділянках фільтра зменшується і більш інтенсивно починають працювати шари в глибині завантаження. В пізні періоди роботи початкові ділянки практично виключаються з роботи і активна очистка в основному здійснюється на кінцевих ділянках фільтрувальної споруди.

Порівнюючи графіки на приведених рисунках, можна зробити висновок, що збільшення швидкості фільтрування при всіх інших рівних характеристиках призводить до зменшення ступеня видалення забруднень за висотою фільтра. І, в той же час, до більш швидкого замулення цього завантаження забрудненнями. Це призводить до зменшення терміну ефективної роботи споруди, тобто зменшення часу фільтроциклу.

На представлених графіках пунктирною горизонтальною лінією обмежено мінімальну відносну концентрацію забруднень ( $\bar{C}_{e1}^* = 0,1$  і

$\bar{C}_{e2}^* = 0,05$ ), яку необхідно забезпечити при очистці на даній установці. На практиці, зазвичай, ця величина задається технологічними умовами або нормативними документами в залежності від вимог споживача або виробництва. В наведених дослідях прийнята необхідна величина концентрації забруднень на виході, яка дорівнює 10% і 5% від її початкового значення, відповідно,  $C_{e1} = 5$  мг/л і  $C_{e2} = 2,5$  мг/л.

Згідно з графіками, приведеними на рис. 4.11, при швидкості фільтрування  $V = 4,08$  м/год, фільтр буде забезпечувати необхідну ступінь очистки 90% протягом 16 годин експлуатації, ступінь очистки 95% – протягом 9 годин. За даними на рис. 4.12, при швидкості фільтрування  $V = 13,04$  м/год, 90% ефект очистки буде забезпечуватись протягом 3 годин, 95% – лише протягом 0,5 години.

Графік, який ілюструє необхідний час роботи фільтра, протягом якого буде забезпечуватись 90% ступінь очистки (величина фільтроцикла), а також залежність зміни інтенсивності видалення забруднень протягом певного часу роботи і за глибиною завантаження при різних швидкостях фільтрування, приведений на рис. 4. 13.

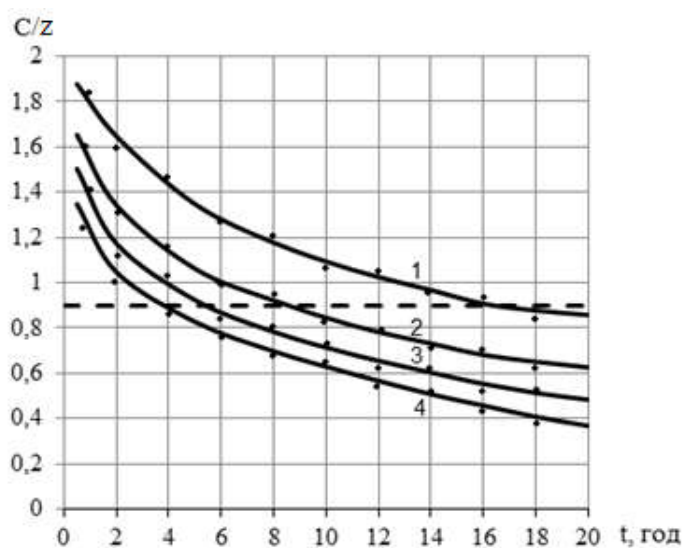


Рис. 4.13. Зміна інтенсивності видалення забруднень ( $C/z$ ) з часом при швидкості фільтрування: 1.  $V = 4,08$  м/год; 2.  $V = 6,93$  м/год; 3.  $V = 9,78$  м/год; 4.  $V = 13,04$  м/год

На ньому пунктирною лінією показано границю, вище якої буде забезпечуватись заданий ступінь очистки води і час фільтроциклу, який необхідний при цьому.

З нашої точки зору, корисними для оцінки ефективності процесу очищення води на фільтрі також є отримані в даній роботі і приведені на рис. 4.14 графіки, де показана зміна відносної концентрації забруднень в кінцевому перерізі очисної споруди ( $\bar{C}_{e1} = C_e/C_0$ ) протягом часу при очистці суспензії з початковою концентрацією зависі  $C_0 = 50$  мг/л в залежності від швидкості фільтрування  $V$ .

На цьому графіку пунктирною лінією показана границя допустимої очистки (95%) на фільтрувальній споруді. На ньому наочно видно величину відносної концентрації забруднень в кінцевому перерізі споруди, якої можна досягти за той чи інший час роботи при різних швидкостях фільтрування. Наприклад, відносна кінцева концентрація забруднень 0,05 при швидкості фільтрування  $V = 4,08$  м/год може бути забезпечена протягом 9 годин роботи фільтра.

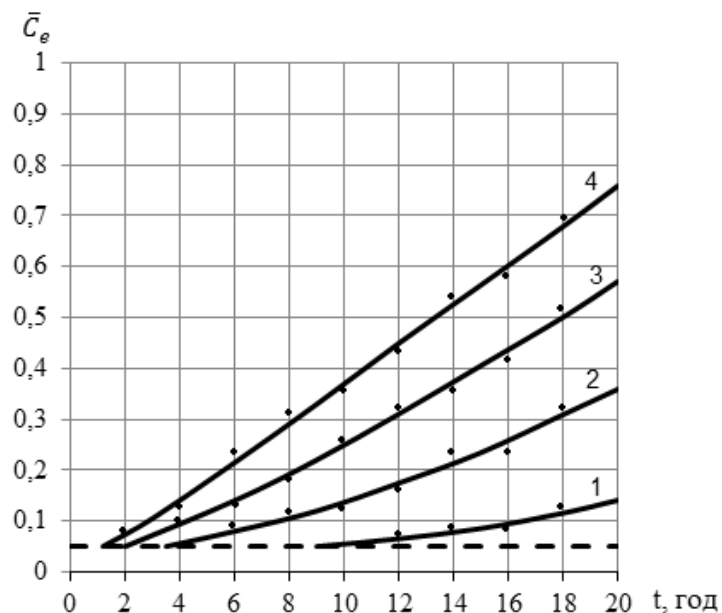


Рис. 4.14. Зміна відносної концентрації забруднень в кінцевому перерізі фільтра з часом при швидкості фільтрування:  
 1.  $V = 4,08$  м/год; 2.  $V = 6,93$  м/год; 3.  $V = 9,78$  м/год;  
 4.  $V = 13,04$  м/год

Забруднення, які в процесі очистки видаляються з води, затримуються і відкладаються в самому завантаженні. З часом, при пропуску і очищенні нових об'ємів суспензії, концентрація затриманих забруднень постійно зростає. При цьому, при досягненні певної величини концентрації затриманих забруднень, їх частина відривається і змивається потоком рідини, що очищається.

Нами в процесі проведення експериментів була виконана серія експериментальних досліджень по визначенню концентрації затриманих завантаженням забруднень. Причому заміри здійснювалися кожену годину роботи фільтрувальної установки.

Як приклад, на рис. 4.15 приведені результати вимірювань концентрації затриманих забруднень за висотою завантаження для випадку фільтрування суспензії з початковою концентрацією забруднень  $C_0 = 50$  мг/л при швидкості фільтрування  $V = 6,93$  м/год. З нього також слідує висновок, що основна маса забруднень затримується у верхніх шарах фільтра протягом всього часу його роботи. Розподіл маси забруднень за висотою шару завантаження залежить від типу зернистого фільтруючого завантаження, виду забруднень, які видаляються при очистці, часу роботи споруди і умов фільтрування.

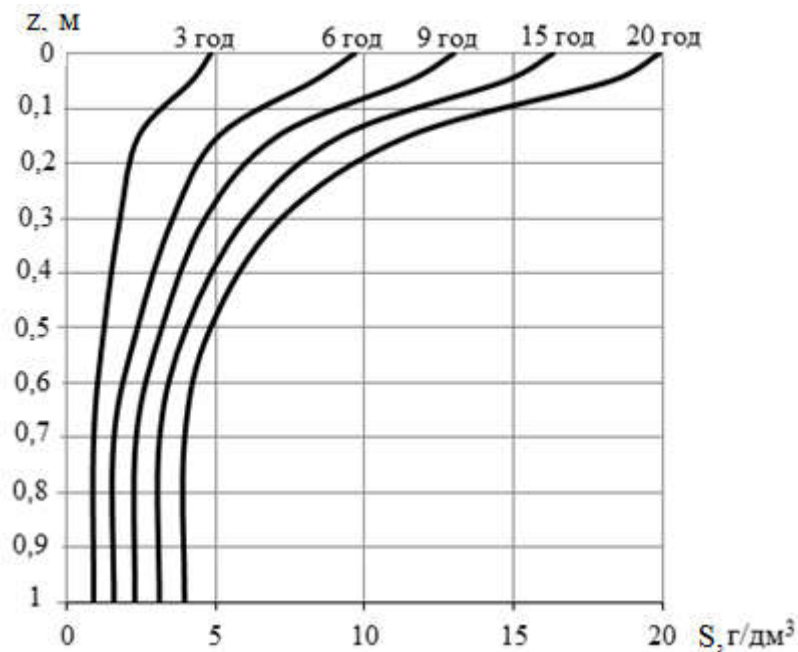


Рис. 4.15. Зміна концентрації затриманих забруднень за товщиною фільтра протягом часу

В розглядуваному випадку при загальній товщині завантаження рівній 1 м в першому шарі товщиною 0,2 м затримується більше 50% всієї маси забруднень. Як приклад, на рис. 4.16 показано розподіл маси затриманих забруднень через 20 годин її роботи. З даного графіка слідує, що основна маса забруднень (до 95 %) затрималась між створами №1 – №4, на товщині завантаження 0,4 м. Схожі результати було отримано авторами в роботі [15].

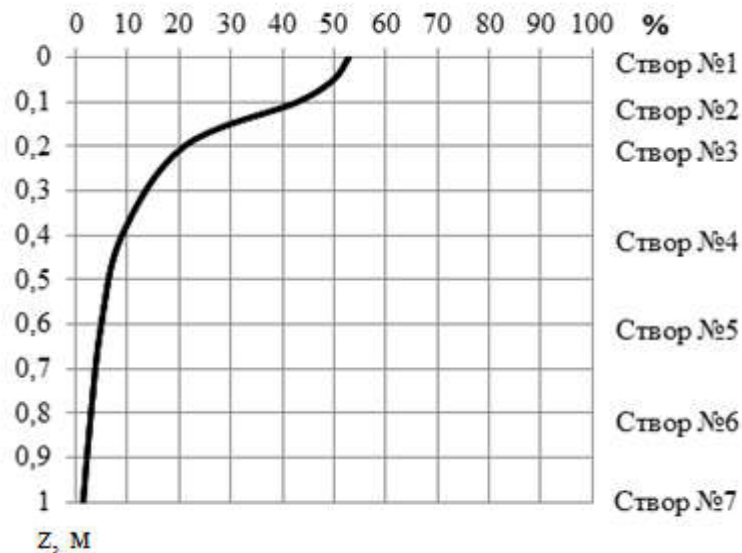


Рис. 4.16. Розподіл маси забруднень за висотою фільтра через 20 годин його роботи

#### 4.3. Залежність пористості фільтруючого матеріалу від концентрації затриманих забруднень

В процесі фільтрування відбувається затримання частинок забруднень фільтруючим зернистим завантаженням. При цьому затримані забруднення осідають і накопичуються в пустотах між частинками завантаження. Це призводить до зменшення об'єму пустот, тобто, до зменшення пористості фільтруючого матеріалу. Можна записати

$$\Delta n = n_0 - n, \quad (4.4)$$

де  $\Delta n$  – зміна (зменшення) пористості фільтруючого матеріалу протягом часу роботи фільтра;  $n_0$  – початкова пористість чистого фільтруючого



завантаження;  $n$  – змінна з часом пористість замуленого матеріалу завантаження.

Величину  $\Delta n$  можна також трактувати як об'єм осаду, який накопичився (затримався) в одиниці об'єму завантаження (питомий об'єм осаду). Відношення  $\Delta \bar{n} = \Delta n / n_0$  називають відносним питомим об'ємом осаду або відносною насиченістю порового простору.

На рис. 4.17 представлена, отримана в проведених нами дослідях, експериментальна залежність зміни  $\Delta \bar{n}$  від відносного коефіцієнта фільтрації завантаження  $\bar{k} = k / k_0$ , який представляє співвідношення між відомими коефіцієнтами фільтрації чистого ( $k_0$ ) і замуленого фільтруючого завантаження ( $k$ ).

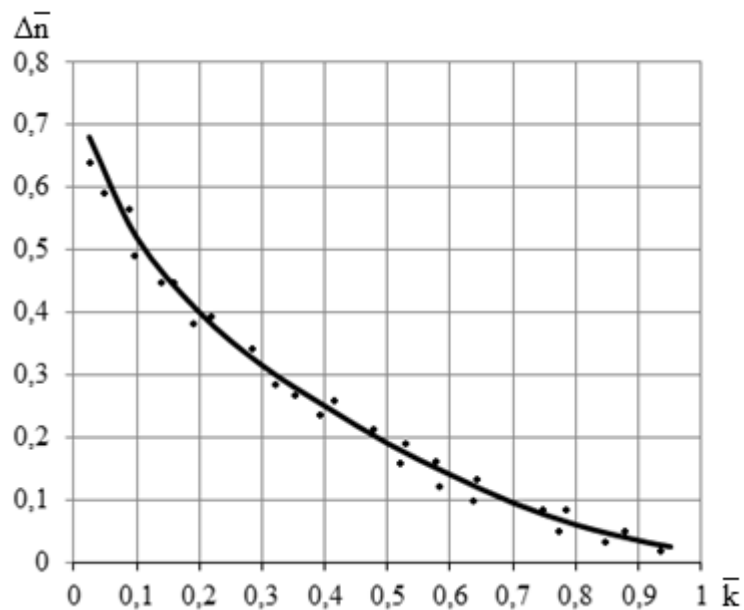


Рис. 4.17. Зміна відносного питомого об'єму осаду від відносного коефіцієнта фільтрації

Аналізуючи представлений графік можна зробити висновок, що збільшення відносного питомого об'єму осаду  $\Delta \bar{n}$  (зменшення вільного порового простору завантаження  $\Delta n$ ) за рахунок впливу затриманих частинок забруднень, викликає суттєве зменшення відносного коефіцієнта фільтрації зернистого завантаження  $\bar{k}$ . Дана графічна залежність задовільно описується залежністю, отриманою в дослідях Д.Н. Мінца [64]

$$\Delta \bar{n} = 1 - \sqrt[3]{k}. \quad (4.5)$$

Очевидно, що величина питомого об'єму осаду  $\Delta n$  і відносного питомого об'єму осаду  $\Delta \bar{n}$  залежатимуть від величини концентрації забруднень ( $S$ ), які затримані завантаженням фільтра. Відповідний дослідний графік приведений на рис. 4.18.

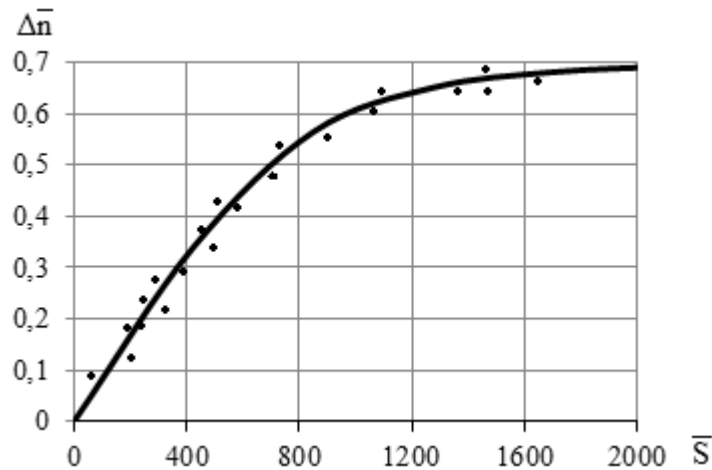


Рис. 4.18. Залежність відносного питомого об'єму осаду від його відносної концентрації в завантаженні

Як слідує з графіка, збільшення  $\bar{S}$  призводить до збільшення  $\Delta \bar{n}$  і  $\Delta n$ . При досягненні певного значення концентрації затриманого осаду  $\bar{S}$  (в нашому випадку  $\bar{S} = 1300$ ) підвищення відносного питомого об'єму осаду більше величини  $\Delta \bar{n} = 0,65$  (зменшення пористості фільтрувального завантаження) практично не відмічається. Це означає, що насиченість порового простору забрудненнями на даній ділянці фільтруючого завантаження, досягла свого граничного значення і на ній, при подальшій роботі фільтра, прояснення суспензії практично не відбувається. Залежність зміни  $\Delta \bar{n}$  від  $\bar{S}$  може бути представлена у вигляді

$$\Delta \bar{n} = 0,7th(0,00124n_0C_0\bar{S}). \quad (4.6)$$

При аналізі і математичному описанні фільтраційних процесів, які мають місце при очистці води, важливою характеристикою затриманого осаду служить відношення об'ємної концентрації осаду до об'ємної концентрації твердих частинок в цьому осаді

$$\gamma = \frac{C_{oc}}{C_m}. \quad (4.6)$$

Даний показник також можна виражати через масові концентрації затриманого осаду і твердої фази в ньому (відношення густин). На основі проведених експериментальних досліджень отримано залежність показника  $\gamma$  від відносного питомого об'єму осаду, яка приведена на рис. 4.19

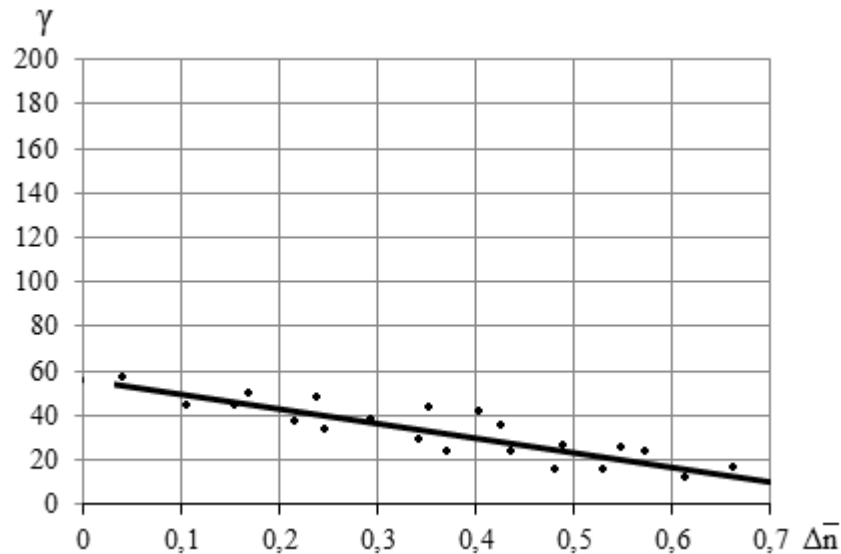


Рис. 4.19. Зміна показника  $\gamma$  в залежності від величини відносного питомого об'єму осаду

З останнього слідує, що збільшення відносного питомого об'єму осаду, тобто об'єму порот в завантаженні, які зайняті затриманим осадом (зменшення вільного об'єму пор), призводить до зменшення показника  $\gamma$ , відповідна залежність має вигляд

$$\gamma = -67\Delta\bar{n} + 57. \quad (4.7)$$

Накопичення осаду в поровому просторі супроводжується його ущільненням, а це в свою чергу викликає збільшення концентрації твердої фази в ньому і, відповідно, підвищення густини цього затриманого осаду. Підтвердженням останнього твердження може служити графік на рис. 4.20, на

якому показана залежність густини затриманого в порах фільтру осаду в залежності від показника  $\gamma$ . Графік на цьому рисунку підтверджує висновок, що збільшення концентрації твердих частинок в осаді (зменшення показника  $\gamma$ ) викликає збільшення його густини. При необмеженому збільшенні показника  $\gamma$  (відсутності твердої фази в осаді) отримуємо густину чистої води ( $\rho_s = 1,0 \text{ кг/дм}^3$ ).

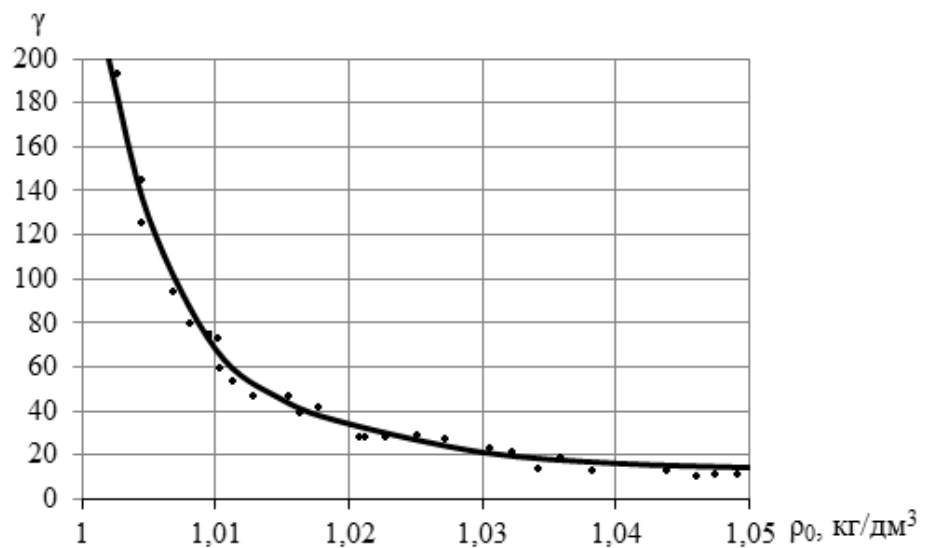


Рис. 4.20. Залежність густини осаду від показника  $\gamma$  (наявності в осаді твердої фази)

#### 4.4. Зміна швидкості фільтрування протягом часу роботи фільтра

Як вже вказувалось в розділі 1, при постійній швидкості руху рідини в очисній споруді, параметри фільтрувального процесу вивчені досить повно. Тому, при проведенні представлених експериментальних досліджень головна увага приділялась аналізу основних характеристик процесу фільтрування, які мають місце при змінній в часі швидкості руху рідини [52].

На рис. 4.21. приведені окремі характерні приклади зміни відносної швидкості фільтрування ( $\bar{V} = V/V_0$ ) з часом при різних значеннях початкової швидкості  $V_0$  і концентрації забруднень  $C_0$ .

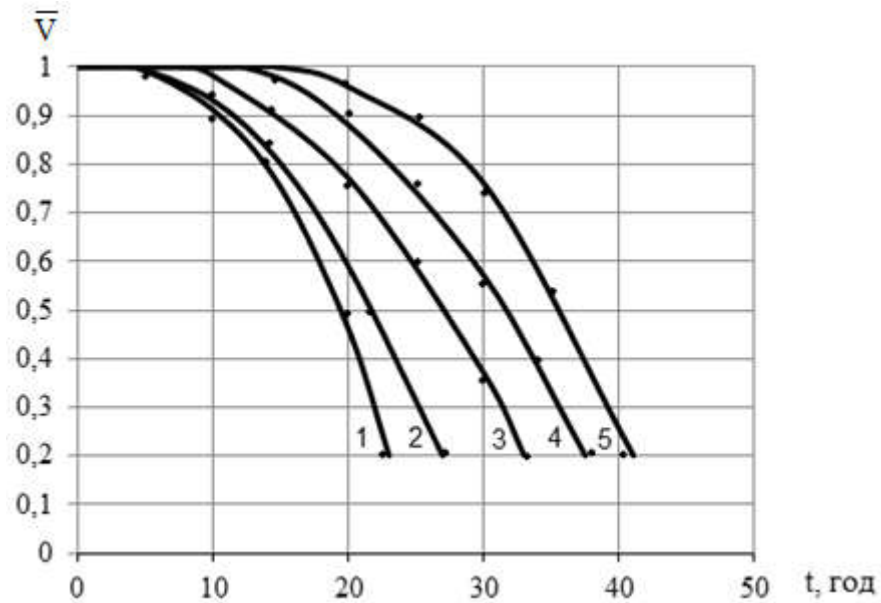


Рис. 4.21. Зміна відносної швидкості фільтрування з часом при початковій концентрації  $C_0 = 100$  мг/л і швидкості  $V_0$ :  
 1.  $V_0 = 7,95$  м/год ( $C_0 = 195$  мг/л); 2.  $V_0 = 10,1$  м/год;  
 3.  $V_0 = 7,85$  м/год; 4.  $V_0 = 5,91$  м/год; 5.  $V_0 = 3,97$  м/год

Аналіз представленого графіка підтверджує той факт, що збільшення початкової концентрації забруднень і початкової швидкості фільтрування зменшує час фільтроциклу, тобто той час коли фільтр буде очищати воду до заданої концентрації забруднень на виході з очисної споруди, при цьому рівень води над поверхнею завантаження також перевищить максимально допустиму відмітку. Крім цього зменшується час при якому фільтр буде працювати з мінімально допустимою швидкістю (витратою). Причому це зменшення не буде прямо пропорційним.

Час роботи фільтру (тривалість фільтроциклу) для умов проведеного експерименту зручно визначати за графіком на рис. 4.22. З нього слідує, що на зменшення швидкості фільтрування з часом активно впливає величина концентрації забруднень і швидкості руху середовища на вході в очисну споруду. Очевидно, що при конкретній початковій концентрації забруднень існує відповідне оптимальне співвідношення початкової швидкості фільтрування, при якому буде забезпечуватись максимальний час роботи фільтру (тривалість фільтроциклу) і досягнення при цьому необхідного

ступеня очистки води. Наприклад, в нашому випадку: при початковій швидкості фільтрування  $V_0 = 7$  м/год і початковій концентрації забруднень  $C_0 = 100$  мг/л величина відносної швидкості  $\bar{V} = 0,5$  (величина витрати дорівнює половині розрахункової) буде досягнута через 28 годин роботи фільтра.

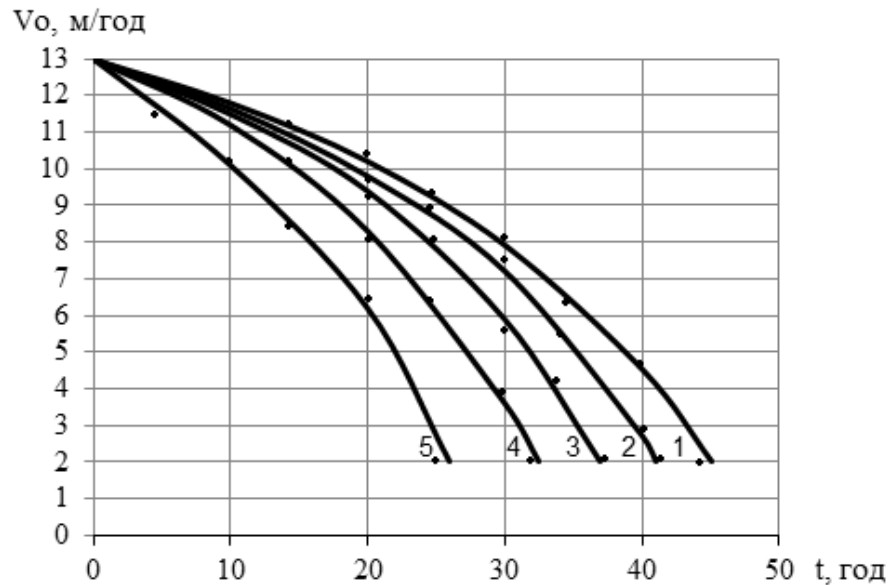


Рис. 4.22. Визначення часу роботи фільтра при забезпеченні мінімально допустимої величини відносної швидкості фільтрування  $\bar{V}$  :  
 1.  $\bar{V} = 0,2$ ; 2.  $\bar{V} = 0,4$ ; 3.  $\bar{V} = 0,6$ ; 4.  $\bar{V} = 0,8$ ; 5.  $\bar{V} = 0,9$

Як вже зазначалось раніше, при роботі фільтра з постійною швидкістю фільтрування з часом коефіцієнт фільтрації зернистого завантаження суттєво зменшується. Очевидно, така ж тенденція буде зберігатись і при змінній в часі швидкості фільтрування.

На рис. 4.23 показано характер зміни середнього за товщиною всього завантаження значення коефіцієнта фільтрації ( $k_{сер}$ ) в залежності від зміни відносної швидкості фільтрування з часом  $\bar{V}$ . З графіка слідує, що більшим значенням швидкості фільтрування при однаковій величині співвідношення  $\bar{V}$ , відповідають більші значення середнього коефіцієнта фільтрації  $k_{сер}$ .

Більш наочним і інформативним для характеристики роботи фільтра є графік приведений на рис. 4.24, на якому показано, як змінюється коефіцієнт фільтрації не в середньому для всього фільтра, а для конкретного шару  $k$  (в даному випадку шар між створами 1 і 2 товщиною 0,1 м). Даний шар є першим

за рухом рідини, що очищається, і в ньому затримується найбільша частина забруднень, які переносяться рідиною.

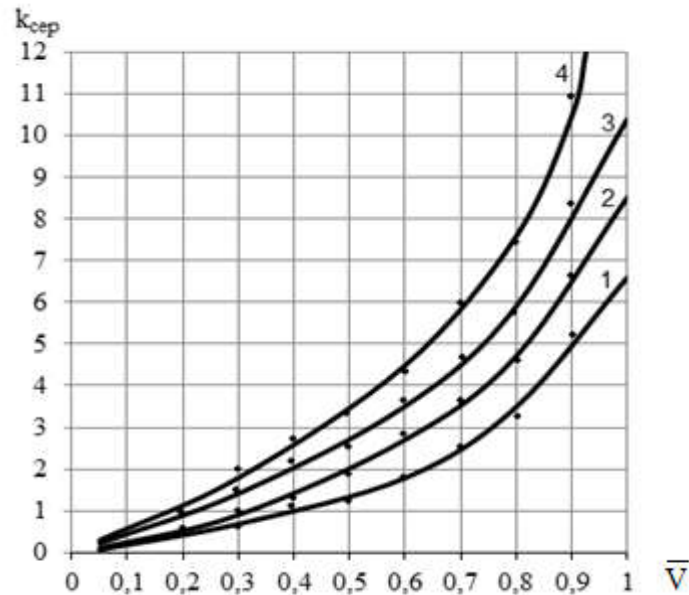


Рис. 4.23. Зміна середнього для всього фільтра коефіцієнта фільтрації в залежності від відносної швидкості фільтрування при початковій швидкості фільтрування  $V_0$ : 1.  $V_0 = 3,97$  м/год; 2.  $V_0 = 5,91$  м/год; 3.  $V_0 = 7,85$  м/год; 4.  $V_0 = 9,78$  м/год

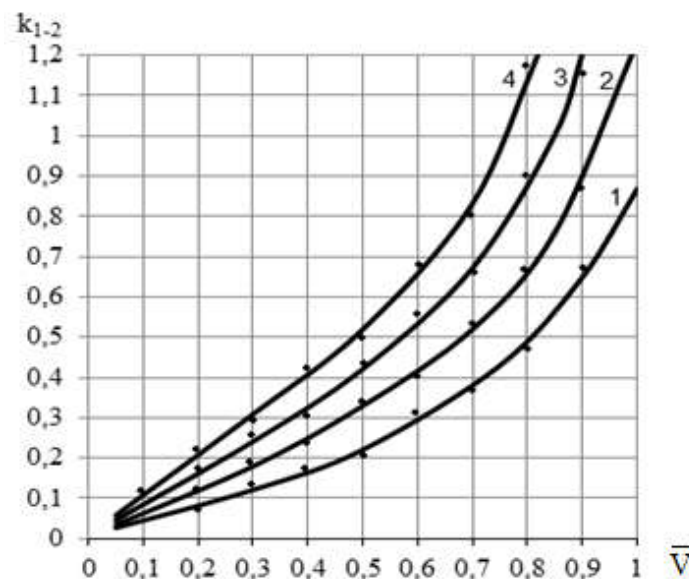


Рис. 4.24. Зміна коефіцієнта фільтрації шару завантаження між створами 1-2 в залежності від відносної швидкості фільтрування при початковій швидкості  $V_0$ : 1.  $V_0 = 3,97$  м/год; 2.  $V_0 = 5,91$  м/год; 3.  $V_0 = 7,85$  м/год; 4.  $V_0 = 9,78$  м/год

Як видно, в цьому шарі завантаження зберігається загальна для всього фільтра тенденція – збільшення величини коефіцієнта фільтрації при збільшенні швидкості руху рідини, однак, конкретні значення коефіцієнта

фільтрації цього шару на порядок менші ніж в середньому для всього фільтру. Збільшення коефіцієнта фільтрації конкретного шару при збільшенні швидкості фільтрування можна пояснити тим, що остання зростає більш інтенсивно ніж гідравлічний похил для даного типу завантаження і забруднень. Характер зміни гідравлічного похилу в завантаженні шару 1-2 представлений на рис. 4.25.

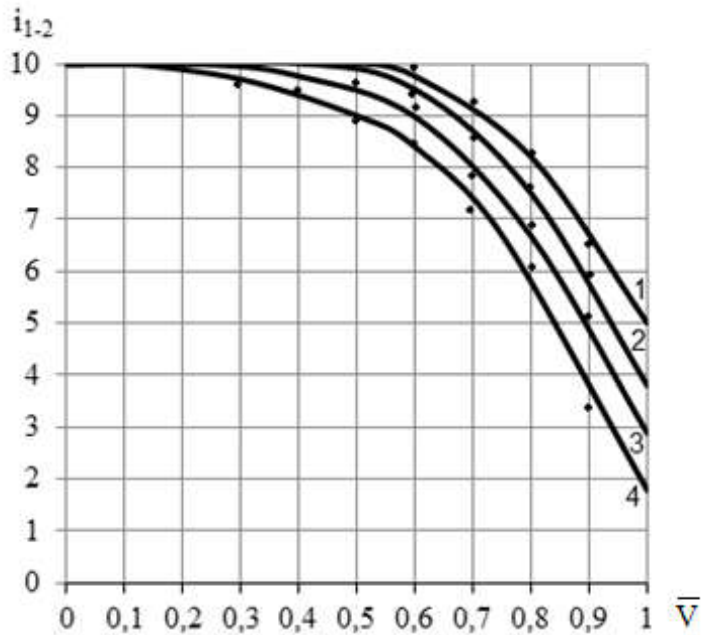


Рис. 4.25. Зміна гідравлічного похилу шару завантаження між створами 1-2 в залежності від відносної швидкості фільтрування при початковій швидкості  $V_0$ :  
 1.  $V_0 = 3,97$  м/год; 2.  $V_0 = 5,91$  м/год;  
 3.  $V_0 = 7,85$  м/год; 4.  $V_0 = 9,78$  м/год

З представленого графіка слідує, що більшим швидкостям фільтрування відповідають більші втрати напору в зернистому завантаженні. Відмічається, що для даного типу зернистого завантаження і виду забруднень, вже при гідравлічному похилі, який дорівнює 10, коефіцієнт фільтрації приймає мінімальні значення. На цих ділянках фільтра протікання рідини через фільтруюче завантаження стає мінімальним. На них має місце граничне насичення порового простору частинками забруднень. Очевидно, що на розглядуваних ділянках затримання забруднення майже не відбувається, а



здійснюється тільки відрив частинок забруднень і ці ділянки практично виключаються з роботи.

Результати проведених досліджень дозволили також встановити експериментальну залежність зміни відносної швидкості фільтрування  $\bar{V}$  від величини відносного коефіцієнта фільтрації  $\bar{k}$ . Даний графік приведений на рис. 4.26.

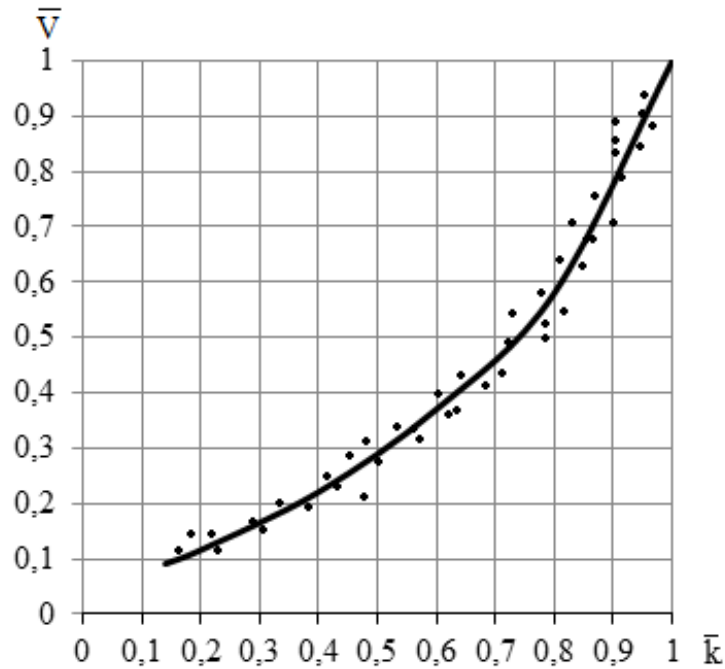


Рис. 4.26. Зміна відносної швидкості фільтрування  $\bar{V}$  в залежності від зміни відносного коефіцієнта фільтрації  $\bar{k}$

Його аналіз показує, що зменшення коефіцієнта фільтрації при роботі фільтра, призводить до суттєвого зменшення швидкості фільтрування. Причому, це зменшення відбувається нерівномірно протягом часу роботи фільтра. Максимальні значення швидкості фільтрування і коефіцієнта фільтрації зернистого завантаження мають місце на початку роботи споруди при незамуленому фільтруючому матеріалі.

#### 4.5. Визначення коефіцієнтів швидкостей прилипання $\alpha$ і відриву $\beta$

Методика визначення величини коефіцієнта  $\alpha$  викладена в розділі 3.4. За відомими з дослідів значеннями змінної за висотою фільтра концентрації

забруднень  $C$ , використовуючи формулу (3.20), розраховуємо значення коефіцієнта прилипання  $a$ . Розрахунки виконуємо для різних швидкостей фільтрування  $V$  і початкових концентраціях забруднень  $C_0$ . Результати розрахунків приведені рис. 4.27.

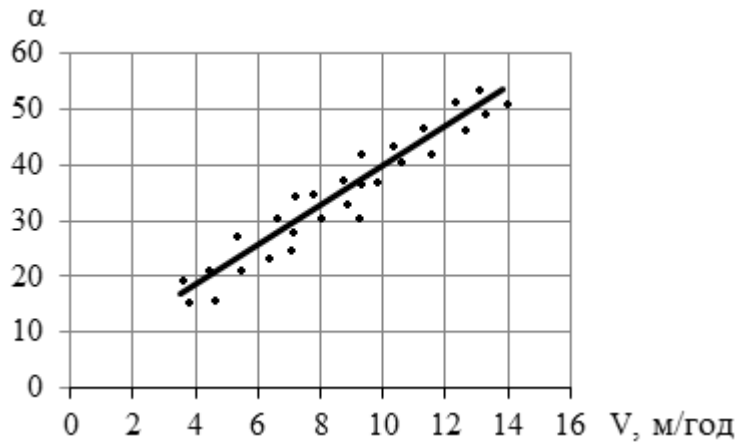


Рис. 4.27. Залежність коефіцієнта швидкості прилипання  $a$  від швидкості фільтрування

Використовуючи дані цього графіка за формулою (3.24) розраховуємо величину показника степені  $l$  в розрахункових формулах. Відповідний графік приведений на рис. 4.28.

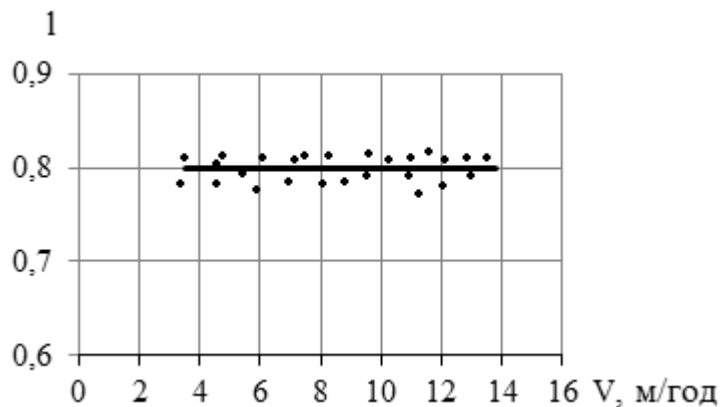


Рис. 4.28. Визначення величини показника степені  $l$

За отриманими значеннями коефіцієнта  $\alpha$  і показника степені  $l$ , за формулою (3.27), знаходимо величину приведенного коефіцієнта швидкості прилипання частинок забруднень до матеріалу завантаження  $a_V$ . Відповідні результати розрахунків показані на рис. 4.29.

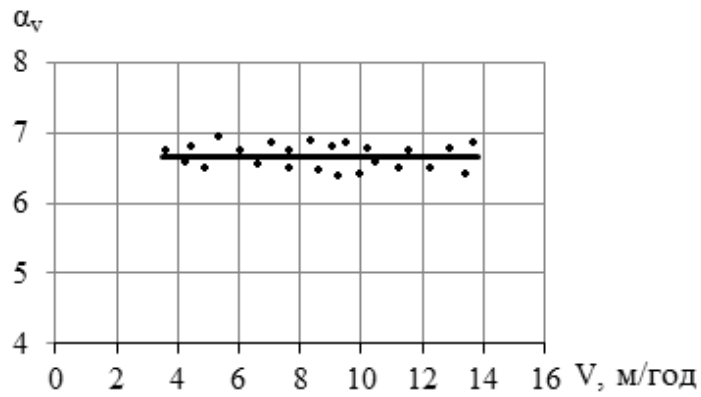


Рис. 4.29. Визначення величини приведенного коефіцієнта  $\alpha_V$

Для визначення величини коефіцієнта швидкості відриву частинок забруднень від часток завантаження  $\beta$  за відомими з дослідів концентраціями затриманих забруднень  $S$  використаємо залежність (3.21). Результати розрахунків приведені на рис. 4.30.

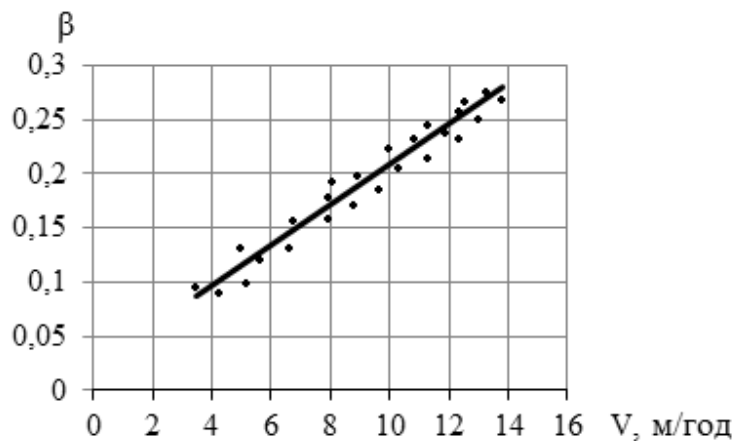


Рис. 4.30. Залежність коефіцієнта швидкості відриву  $\beta$  від швидкості фільтрування

Далі, за формулою (3.26) розраховуємо величину показника степені  $q$ . Результати розрахунку приведені на рис. 4.31.

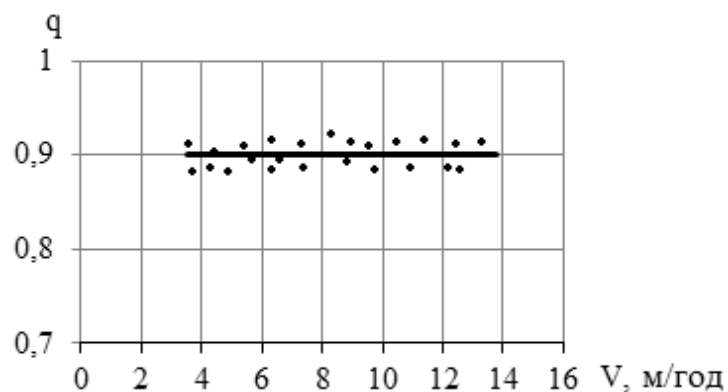


Рис. 4. 31. Визначення величини показника степені  $q$

За відомими значеннями  $\beta$  і  $q$  за залежністю (3.28) знаходимо значення приведенного коефіцієнта швидкості відриву частинок забруднень від частинок завантаження  $\beta_V$ . Результати розрахунків приведені на рис. 4.32.

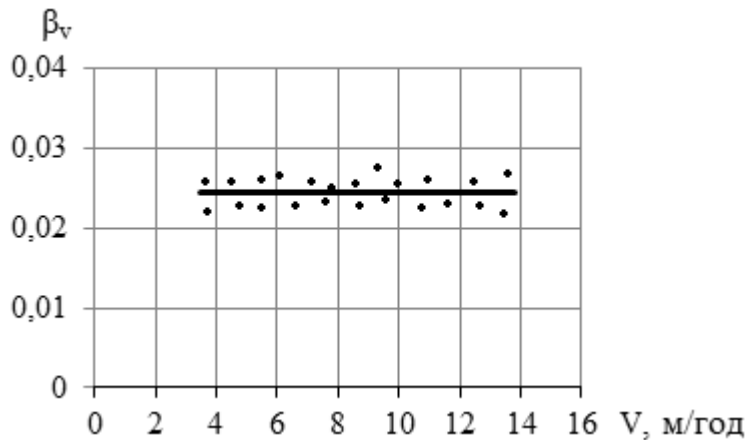


Рис. 4.32. Визначення величини приведенного коефіцієнта  $\beta_V$

Після виконання необхідних розрахунків, остаточно отримаємо значення відповідних коефіцієнтів:  $l = 0,8 \pm 0,04$ ;  $a_V = 6,65 \pm 0,3$ ;  $q = 0,9 \pm 0,05$ ;  $\beta_V = 0,025 \pm 0,001$ .

#### 4.6. Висновки до розділу 4

На основі проведених експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Визначені гідравлічні характеристики незабрудненого зернистого завантаження модельного фільтра при пропуску чистої води. Отримані результати добре співпадають з існуючими даними.

2. Проведено дослідження гідравлічного опору завантаження фільтра при пропуску рідини з різними концентраціями забруднень. З'ясовано характер залежності величини опору від початкової концентрації забруднень у воді і з часом.

3. З'ясовано закономірності зміни коефіцієнта фільтрації зернистого завантаження з часом в залежності від швидкості фільтрування, за глибиною

завантаження і величини питомого об'єму осаду для різних умов і режимів роботи фільтрувальної споруди.

4. Досліджено інтенсивність видалення забруднень і ступінь їх накопичення з часом за висотою фільтруючого завантаження. Відмічається, що максимальна швидкість даних процесів має місце у верхніх шарах фільтра.

5. Підтверджено, що збільшення концентрації затриманого у завантаженні осаду  $S$  призводить до зменшення його пористості  $n$ . Визначено, що підвищення відносного питомого об'єму осаду більше  $\Delta n/n_0=0,65$  практично не викликає подальшого прояснення суспензії.

6. Показано, що важливою характеристикою затриманого осаду слугує відношення об'ємної концентрації осаду до об'ємної концентрації твердих частинок в цьому осаді. Отримано експериментальну залежність цього показника від величини відносного питомого об'єму осаду.

7. Досліджено характер зміни швидкості фільтрування з часом в залежності від концентрації забруднень у рідині і фільтраційних характеристик завантаження.

8. Визначено величини приведених коефіцієнтів швидкості прилипання ( $\alpha_V = 6,65 \pm 0,3$ ) і відриву ( $\beta_V = 0,025 \pm 0,001$ ) частинок забруднень, а також значення відповідних показників степені  $l = 0,8 \pm 0,04$  і  $q = 0,9 \pm 0,05$ .

## РОЗДІЛ 5

### АПРОБАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДИК І ОЦІНКА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

#### 5.1. Методика інженерного розрахунку швидких фільтрів

Проведений в роботі аналіз умов роботи швидких фільтрів дозволив розробити і запропонувати для практичного використання нову методику розрахунку даних споруд. Особливістю і перевагою даної методики є можливість її застосування для розрахунку роботи фільтрів, що працюють як з постійною, так і зі змінною з часом швидкістю фільтрування.

Дана методика базується на результатах аналітичного розв'язку математичної моделі, яка описує особливості видалення забруднень зернистим завантаженням фільтра. При її розробці також використані результати експериментальних досліджень як автора, так і інших дослідників. Особливістю методики є те, що при її застосуванні, для спрощення отримання результатів, є можливість і необхідність використання сучасного програмного забезпечення ПК “Mathcad”, “Matlab” та ін. призначених для математичного аналізу і розв'язання прикладних задач.

При здійсненні розрахунків швидких фільтрів за методикою, що пропонується, в залежності від завдання, яке стоїть перед проектувальником, для отримання достовірних результатів, слід в повному обсязі мати надійну початкову інформацію і виконати ряд обов'язкових стандартних дій. Послідовність виконання розрахунків має вигляд (рис. 5.1).

Як правило, це повинна бути інформація про матеріал зернистого завантаження: густина матеріалу частинок ( $\rho_c$ ), еквівалентний діаметр ( $d_{ек}$ ) і коефіцієнт форми часток ( $a_\phi$ ), пористість матеріалу завантаження ( $n_0$ ), коефіцієнт фільтрації ( $k_0$ ), висота (товщина) фільтрувального шару ( $L$ ); початкова концентрація забруднень у воді, що очищається ( $C_0$ ), необхідний ступінь очистки води (технологічно максимально допустима концентрація

забруднень в очищеній воді ( $C_{e^*}$ ); витрата води, що очищається ( $Q$ ), початкова ( $V_m$ ) і мінімально допустима швидкість фільтрування ( $V^*$ ); максимально допустиме підвищення рівня води над поверхнею завантаження ( $H_{W^*}$ ). При цих даних, зазвичай, шуканою величиною є час фільтроциклу ( $t_f$ ).

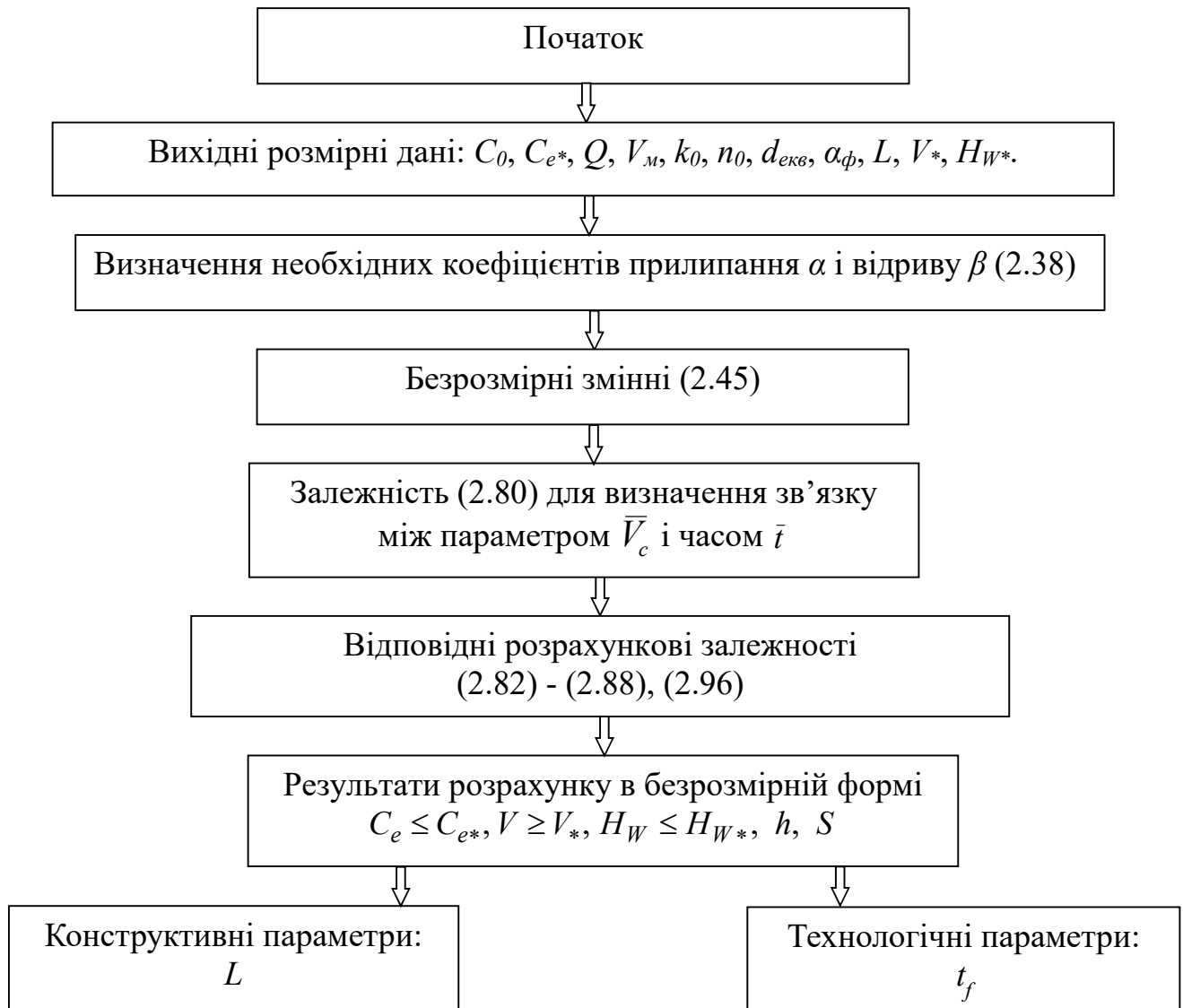


Рис. 5.1. Послідовність виконання розрахунків

На першому етапі за залежністю (2.38) визначаємо величину коефіцієнтів прилипання ( $\alpha$ ) і відриву ( $\beta$ ).

Виконання розрахунків і аналіз математичних залежностей доцільно виконувати в безрозмірних величинах. Для цього на другому етапі запропонованої методики передбачається приведення всіх розрахункових

параметрів до безрозмірного вигляду шляхом введення нових змінних, які розглянуто в другому розділі даної роботи (2.45).

Наступним етапом розрахунку є визначення зв'язку між параметром  $\bar{V}_c$  і безрозмірним часом  $\bar{t}$ , який слід здійснювати підбором із залежності (2.80) з використанням програмного забезпечення ПК “Mathcad”, “Matlab” та ін. При цьому задаючись значеннями  $\bar{V}_c$ , слід намагатися досягти ситуації, коли права частина залежності (2.80) стає практично рівною нулю. Знайдене при цьому значення  $\bar{V}_c$  слід використовувати в подальших розрахунках при визначенні інших основних розрахункових параметрів в безрозмірній формі  $\bar{C}_e, \tilde{h}, \tilde{H}_w, \bar{t}_f, \bar{V}, \bar{S}$  за відповідними формулами: (2.82) – (2.88), (2.96).

Зворотній перехід від безрозмірних змінних до розмірних величин здійснюється із застосуванням розглянутих вище співвідношень.

## 5.2. Приклади розрахунку швидких фільтрів

За запропонованою в роботі методикою нижче приведено серію розрахунків швидких фільтрів з різними характеристиками і умовами роботи.

**Приклад 1.** Визначити концентрацію забруднень в кінцевому перерізі швидкого фільтра  $C_e$  з характеристиками: висота зернистого фільтруючого завантаження  $L = 1$  м; пористість матеріалу  $n_0 = 0,4$ ; коефіцієнт фільтрації чистого завантаження  $k_0 = 40$  м/год; початкова концентрація забруднень  $C_0 = 50$  мг/л; початкова швидкість фільтрування  $V_m = 6$  м/год; коефіцієнти  $\alpha_V = 6,65$ ;  $\beta_V = 0,025$ ;  $l = 0,8$ ;  $q = 0,9$ ;  $\bar{\gamma} = 0,001$ ; час роботи фільтра  $t = 8$  год.

- У відповідності з приведеною послідовністю розрахунку (рис. 5.1) переходимо від розмірних величин до безрозмірних використовуючи співвідношення (2.38) і (2.45):



$$\bar{t} = \frac{V_M t}{n_0 L} = \frac{6 \cdot 8}{0,4 \cdot 1} = 120, \quad \bar{\alpha}_v = \alpha_v L V_M^{l-1} = 6,65 \cdot 1 \cdot 6^{0,8-1} = 4,65,$$

$$\bar{\beta}_v = \beta_v n_0 L V_M^{q-1} = 0,025 \cdot 0,4 \cdot 1 \cdot 6^{0,9-1} = 0,0084.$$

- З формули (2.80), використовуючи програму “Mathcad”, підбором знаходимо зв’язок між параметром  $\bar{V}_c$  і часом  $\bar{t} = 120$ , маємо  $\bar{V}_c = 0,996146$ .

- Відносну концентрацію забруднень на виході з фільтра розраховуємо за формулою (2.85)

$$\bar{C}_e(1, \bar{t}, \bar{V}_c) = e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1}} [e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \bar{t}} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-1} \bar{t}}) + \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \int_0^{\bar{t}} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{z} \eta}) d\eta] = 0,08.$$

- В розмірних величинах остаточно отримаємо:

$$C_e = C_0 \bar{C}_e = 50 \cdot 0,08 = 4 \text{ мг/л.}$$

**Приклад 2.** Для швидкого фільтра з характеристиками: висота зернистого фільтруючого завантаження  $L = 1,2$  м; пористість матеріалу  $n_0 = 0,4$ ; коефіцієнт фільтрації чистого завантаження  $k_0 = 40$  м/год; початкова концентрація забруднень у воді  $C_0 = 40$  мг/л; максимально допустима концентрація в очищеній воді  $C_{e*} = 2$  мг/л; початкова швидкість фільтрування  $V_M = 7$  м/год; мінімально допустима швидкість фільтрування  $V_* = 5$  м/год; максимально допустимий рівень води над зернистим завантаженням  $H_{W*} = 2$  м;  $H_{out} = 1,2$  м; коефіцієнти  $\alpha_v = 6,65$ ;  $\beta_v = 0,025$ ;  $l = 0,8$ ;  $q = 0,9$ ;  $\bar{\gamma} = 0,002$ . Визначити час фільтроциклу  $t_f$  для цього випадку.

- Переходимо від розмірних величин до безрозмірних (2.45):

$$\bar{C}_e^* = \frac{C_e^*}{C_0} = \frac{2}{40} = 0,05, \quad \bar{z} = \frac{z}{L} = 1, \quad \bar{V}_* = \frac{V_*}{V_M} = \frac{5}{7} = 0,71,$$

$$\Delta h_M = \frac{LV}{k_0} = \frac{1,2 \cdot 7}{40} = 0,21, \quad \tilde{H}_W = \frac{H_{W*} - H_{out}}{\Delta h_M} = \frac{2 - 1,2}{0,21} = 3,8,$$

$$\bar{\alpha}_v = \alpha_v L V_M^{l-1} = 6,65 \cdot 1,2 \cdot 7^{0,8-1} = 5,39,$$

$$\bar{\beta}_v = \beta_v n_0 L V_M^{q-1} = 0,025 \cdot 0,4 \cdot 1,2 \cdot 7^{0,9-1} = 0,01.$$

Приймаємо декілька значень проміжків часу:  $t_1 = 1$  год;  $t_2 = 3$  год;  $t_3 = 6$  год;  $t_4 = 7$  год;  $t_5 = 8$  год;  $t_6 = 9$  год;  $t_7 = 12$  год. Тоді, час в безрозмірному вигляді буде:

$$\bar{t}_1=14,6; \bar{t}_2=43,8; \bar{t}_3=87,5; \bar{t}_4=102,1; \bar{t}_5=116,7; \bar{t}_6=131,2; \bar{t}_7=175.$$

- З формули (2.80), використовуючи програму “Mathcad”, підбором знаходимо зв’язок між параметром  $\bar{V}_c$  і часом  $\bar{t}$ . Відповідні значення параметра  $\bar{V}_c$  будуть:  $\bar{V}_{c1} = 0,99543$ ;  $\bar{V}_{c2} = 0,99295$ ;  $\bar{V}_{c3} = 0,98973$ ;  $\bar{V}_{c4} = 0,98775$ ;  $\bar{V}_{c5} = 0,98595$ ;  $\bar{V}_{c6} = 0,98389$ ;  $\bar{V}_{c7} = 0,97593$ .

- Відносну концентрацію забруднень в кінці фільтра для всіх пар значень  $\bar{t}$  і  $\bar{V}_c$  розраховуємо за формулою (2.85):

$$\bar{C}_{e1} = 0,008; \bar{C}_{e2} = 0,019; \bar{C}_{e3} = 0,041; \bar{C}_{e4} = 0,05; \bar{C}_{e5} = 0,06; \bar{C}_{e6} = 0,071; \bar{C}_{e7} = 0,108.$$

- Для розрахунку значень відносної швидкості  $\bar{V}$  і відносного рівня води над завантаженням  $\tilde{H}_w$  для тих же пар значень  $\bar{t}$  і  $\bar{V}_c$  використовуємо, відповідно, залежності (2.87) і (2.82).

Для визначення часу роботи фільтра, при якому відносна концентрація забруднень в його кінцевому перерізі стане рівною  $\bar{C}_e^* = 0,05$ , відносна швидкість  $\bar{V}_* = 0,71$ , відносний рівень води над завантаженням  $\tilde{H}_* = 3,8$ , за даними розрахунків побудуємо відповідні графіки (рис. 5.2а, 5.2б, 5.2в).

Пунктиром на приведених графіках показані величини відносних граничних значень, відповідно, концентрації забруднень на виході з фільтра ( $\bar{C}_e^* = 0,05$ ), мінімально допустимої відносної швидкості фільтрування ( $\bar{V}_* = 0,71$ ), максимального відносного рівня води над завантаженням ( $\tilde{H}_* = 3,8$ ).

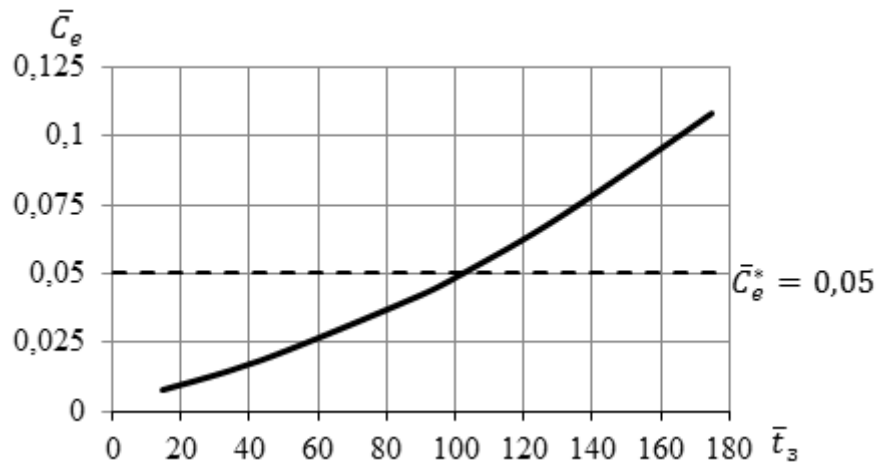


Рис. 5.2а. Графік зміни з часом відносної концентрації забруднень на виході з фільтра

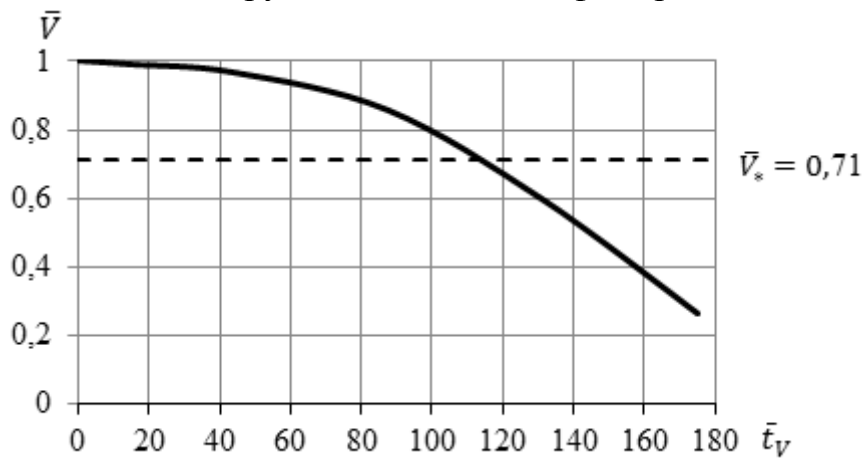


Рис. 5.2б. Графік зміни відносної швидкості фільтрування з часом

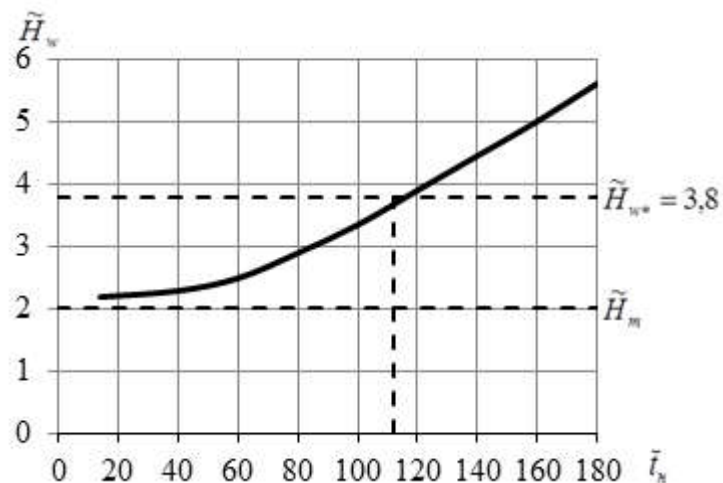


Рис. 5.2в. Графік зміни відносного рівня води над завантаженням з часом

З рис. 5.2а слідує, що відносний час досягнення відносної граничної концентрації на виході з фільтра (відносний час захисної дії фільтра) дорівнює

$\bar{t}_p = 102,1$ , з рис. 5.2б, що відносний час, при якому відносна швидкість буде не менше гранично допустимої,  $\bar{t}_V = 114,3$ , з рис. 5.2в, що відносний час, при якому відносний рівень води над завантаженням не перевищить максимально допустимий,  $\bar{t}_H = 116,7$ .

Перехід від безрозмірного часу до розмірних величин дає:

$$t_p = \frac{\bar{t}_p \cdot n_0 \cdot L}{V_m} = \frac{102,1 \cdot 0,4 \cdot 1,2}{7} = 7,0 \text{ год}; \quad t_V = \frac{\bar{t}_V \cdot n_0 \cdot L}{V_m} = \frac{114,3 \cdot 0,4 \cdot 1,2}{7} = 7,8 \text{ год};$$

$$t_H = \frac{\bar{t}_H \cdot n_0 \cdot L}{V_m} = \frac{116,7 \cdot 0,4 \cdot 1,2}{7} = 8,0 \text{ год}.$$

Як показано раніше (2.96), при відомих величинах  $t_3$ ,  $t_V$ ,  $t_H$  за час фільтроциклу приймається менше з цих трьох термінів. Таким чином, в розглядуваному випадку час фільтроциклу  $t_f$  буде дорівнювати 7,0 годин.

**Приклад 3.** Визначити мінімальну висоту зернистого завантаження  $L$ , при якій протягом фільтроциклу  $t_f = 6$  годин буде забезпечена необхідна якість очистки води  $C_e^* < 1$  мг/л, для швидкого фільтра з характеристиками: пористість використаного завантаження  $n_0 = 0,42$ ; його коефіцієнт фільтрації  $k_0 = 38$  м/год; початкова концентрація забруднень у воді  $C_0 = 20$  мг/л; початкова швидкість фільтрування  $V_m = 6$  м/год; мінімально допустима швидкість фільтрування  $V_* = 4$  м/год; коефіцієнти  $\alpha_V = 6,65$ ;  $\beta_V = 0,025$ ;  $l = 0,8$ ;  $q = 0,9$ ;  $\bar{\gamma} = 0,002$ .

- Переходимо від розмірних величин до безрозмірних (2.45):

$$\bar{C}_e^* = \frac{C_e^*}{C_0} = \frac{1}{20} = 0,05, \quad \bar{z} = \frac{z}{L} = 1, \quad \bar{V}_* = \frac{V_*}{V_m} = \frac{4}{6} = 0,67.$$

- Задаємося кількома значеннями висоти завантаження:  $L_1 = 1,0$  м;  $L_2 = 1,05$  м;  $L_3 = 1,1$  м;  $L_4 = 1,2$  м. І розраховуємо відповідні їм відносні характеристики:

$$\bar{t}_1 = \frac{V_M t}{n_0 L_1} = \frac{6 \cdot 6}{0,42 \cdot 1,0} = 85,7; \quad \bar{\alpha}_{v1} = \alpha_v L_1 V_M^{l-1} = 6,65 \cdot 1,0 \cdot 6^{0,8-1} = 4,65;$$

$$\bar{\beta}_{v1} = \beta_v n_0 L_1 V_M^{q-1} = 0,025 \cdot 0,4 \cdot 1,0 \cdot 6^{0,9-1} = 0,0084;$$

$$\bar{t}_2 = \frac{V_M t}{n_0 L_2} = \frac{6 \cdot 6}{0,42 \cdot 1,05} = 81,6; \quad \bar{\alpha}_{v2} = \alpha_v L_2 V_M^{l-1} = 6,65 \cdot 1,05 \cdot 6^{0,8-1} = 4,88;$$

$$\bar{\beta}_{v2} = \beta_v n_0 L_2 V_M^{q-1} = 0,025 \cdot 0,4 \cdot 1,05 \cdot 6^{0,9-1} = 0,0088;$$

$$\bar{t}_3 = \frac{V_M t}{n_0 L_3} = \frac{6 \cdot 6}{0,42 \cdot 1,1} = 77,9; \quad \bar{\alpha}_{v3} = \alpha_v L_3 V_M^{l-1} = 6,65 \cdot 1,1 \cdot 6^{0,8-1} = 5,11;$$

$$\bar{\beta}_{v3} = \beta_v n_0 L_3 V_M^{q-1} = 0,025 \cdot 0,4 \cdot 1,1 \cdot 6^{0,9-1} = 0,0092;$$

$$\bar{t}_4 = \frac{V_M t}{n_0 L_4} = \frac{6 \cdot 6}{0,42 \cdot 1,2} = 71,4; \quad \bar{\alpha}_{v4} = \alpha_v L_4 V_M^{l-1} = 6,65 \cdot 1,2 \cdot 6^{0,8-1} = 5,58;$$

$$\bar{\beta}_{v4} = \beta_v n_0 L_4 V_M^{q-1} = 0,025 \cdot 0,4 \cdot 1,2 \cdot 6^{0,9-1} = 0,01.$$

- З формули (2.80), використовуючи програму “Mathcad”, підбором знаходимо зв’язок між параметром  $\bar{V}_c$  і часом  $\bar{t}$ .

Відповідні значення параметра  $\bar{V}_c$  будуть:  $\bar{V}_{c1} = 0,99021$ ;  $\bar{V}_{c2} = 0,99082$ ;  
 $\bar{V}_{c3} = 0,99154$ ;  $\bar{V}_{c4} = 0,99246$ .

- Відносну концентрацію забруднень в кінці фільтра для всіх значень  $\bar{V}_c$  визначаємо за формулою (2.85)

$$\begin{aligned} \bar{C}_{e1}(1, \bar{t}, \bar{V}_c) = e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1}} [e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^q \bar{t}} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-1} \bar{t}}) + \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \int_0^{\bar{V}_c \bar{t}} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^q \eta} \cdot \\ \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{z} \eta}) d\eta] = 0,059; \\ \bar{C}_{e2} = 0,050; \quad \bar{C}_{e3} = 0,043; \quad \bar{C}_{e4} = 0,031. \end{aligned}$$

Для знаходження висоти завантаження, при якому відносна концентрація забруднень в його кінцевому перерізі буде рівною  $\bar{C}_e^* = 0,05$ , за даними розрахунків побудуємо відповідний графік

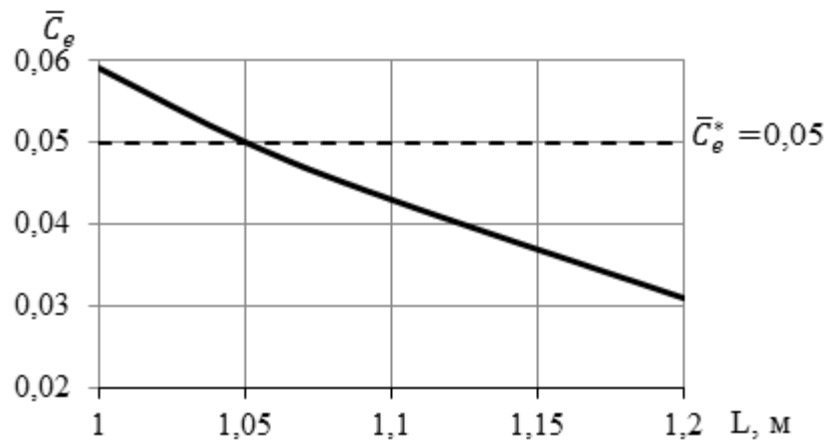


Рис. 5.3. Графік зміни відносної концентрації на виході з фільтра в залежності від товщини завантаження

Пунктиром на приведеному графіку показана величина відносної граничної концентрації забруднень, яка повинна бути забезпечена на виході з фільтра ( $\bar{C}_e^* = 0,05$ ). Мінімальна товщина завантаження, при якій буде забезпечуватись необхідний ступінь очистки, становить  $L = 1,05$  м.

### 5.3. Порівняльна оцінка ефективності запропонованих розв'язків

**Варіант 1.** Виконати порівняльний аналіз результатів розрахунку за запропонованою в даній роботі методикою і методикою Д. Мінца, яка розроблена на основі технологічного моделювання.

Розрахувати час роботи швидкого фільтра (час фільтроцикла  $t_f$ ) з характеристиками: товщина зернистого завантаження  $L = 1,2$  м; коефіцієнт фільтрації матеріалу  $k_0 = 49$  м/год; пористість  $n_0 = 0,47$ ; еквівалентний діаметр частинок зернистого завантаження  $d_{ек} = 0,0015$  м; початкова концентрація забруднень у воді, яка подається на очистку,  $C_0 = 50$  мг/л; необхідна концентрація забруднень в кінці фільтра  $C_{e^*} = 2,5$  мг/л; коефіцієнти  $a_V = 6,65$ ;  $\beta_V = 0,025$ ;  $l = 0,8$ ;  $q = 0,9$ ;  $\bar{\gamma} = 0,001$ ; розрахунки провести для різних початкових швидкостей фільтрування:  $V_{m1} = 3$  м/год;  $V_{m2} = 6$  м/год;  $V_{m3} = 9$  м/год;  $V_{m4} = 12$  м/год.

- Розрахунок за методикою запропонованою в даній роботі.

Спочатку розглянемо випадок швидкості фільтрування  $V_{M1} = 3$  м/год.

Переходимо від розмірних величин до безрозмірних (2.45):

$$\bar{C}_e^* = \frac{C_e^*}{C_0} = \frac{2,5}{50} = 0,05, \quad \bar{\alpha}_v = \alpha_v L V_M^{l-1} = 6,65 \cdot 1,2 \cdot 3^{0,8-1} = 6,4,$$

$$\bar{\beta}_v = \beta_v n_0 L V_M^{q-1} = 0,025 \cdot 0,47 \cdot 1,2 \cdot 3^{0,9-1} = 0,0126.$$

Приймаємо декілька значень проміжків часу:  $t_1 = 1$  год;  $t_2 = 3$  год;  $t_3 = 5$  год;  $t_4 = 7$  год;  $t_5 = 9$  год;  $t_6 = 11$  год;  $t_7 = 13$  м/год;  $t_8 = 15$  м/год;  $t_9 = 20$  год;  $t_{10} = 25$  год. Тоді, час в безрозмірному вигляді буде:  $\bar{t}_1 = 5,3$ ;  $\bar{t}_2 = 16$ ;  $\bar{t}_3 = 26,6$ ;  $\bar{t}_4 = 37,2$ ;  $\bar{t}_5 = 47,9$ ;  $\bar{t}_6 = 58,5$ ;  $\bar{t}_7 = 69,1$ ;  $\bar{t}_8 = 79,8$ ;  $\bar{t}_9 = 106,4$ ;  $\bar{t}_{10} = 133$ .

За формулою (2.80), використовуючи програму “Mathcad”, підбором знаходимо зв’язок між параметром  $\bar{V}_c$  і часом  $\bar{t}$ .

Відповідні значення параметра  $\bar{V}_c$  складуть:  $\bar{V}_{c1} = 0,998565$ ;  $\bar{V}_{c2} = 0,997687$ ;  $\bar{V}_{c3} = 0,997296$ ;  $\bar{V}_{c4} = 0,997030$ ;  $\bar{V}_{c5} = 0,996817$ ;  $\bar{V}_{c6} = 0,996632$ ;  $\bar{V}_{c7} = 0,996461$ ;  $\bar{V}_{c8} = 0,996301$ ;  $\bar{V}_{c9} = 0,995935$ ;  $\bar{V}_{c10} = 0,995603$ .

Відносну концентрацію забруднень в кінці фільтра для всіх визначених значень  $\bar{V}_c$  розраховуємо за формулою (2.85)

$$\bar{C}_{e1}(1, \bar{t}, \bar{V}_c) = e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1}} [e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^q \bar{t}} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-1} \bar{t}}) + \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \int_0^{\bar{t}} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^q \eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2} \eta}) d\eta] = 0,0024;$$

$$\bar{C}_{e2} = 0,0043; \bar{C}_{e3} = 0,0066; \bar{C}_{e4} = 0,0099; \bar{C}_{e5} = 0,013; \bar{C}_{e6} = 0,017; \bar{C}_{e7} = 0,021; \bar{C}_{e8} = 0,026; \bar{C}_{e9} = 0,41; \bar{C}_{e10} = 0,06.$$

Аналогічні розрахунки виконуємо для інших швидкостей фільтрування.

При  $V_{M2} = 6$  м/год –  $\bar{C}_{e1} = 0,0067$ ;  $\bar{C}_{e2} = 0,014$ ;  $\bar{C}_{e3} = 0,025$ ;

$$\bar{C}_{e4} = 0,038; \bar{C}_{e5} = 0,053; \bar{C}_{e6} = 0,071.$$

При  $V_{M3} = 9$  м/год –  $\bar{C}_{e1} = 0,012$ ;  $\bar{C}_{e2} = 0,029$ ;  $\bar{C}_{e3} = 0,052$ ;  $\bar{C}_{e4} = 0,082$ .

При  $V_{m4} = 12$  м/год -  $\bar{C}_{e1} = 0,018$ ;  $\bar{C}_{e2} = 0,047$ ;  $\bar{C}_{e3} = 0,088$ .

Для знаходження часу роботи фільтра при різних швидкостях фільтрування, при якому відносна концентрація забруднень в його кінцевому перерізі стане рівною  $\bar{C}_{e^*} = 0,05$ , за даними розрахунків будемо відповідні графіки (рис. 5.4).

Пунктиром на приведеному графіку показана величина відносного граничного значення концентрації забруднень на виході з фільтра ( $\bar{C}_{e^*} = 0,05$ ).

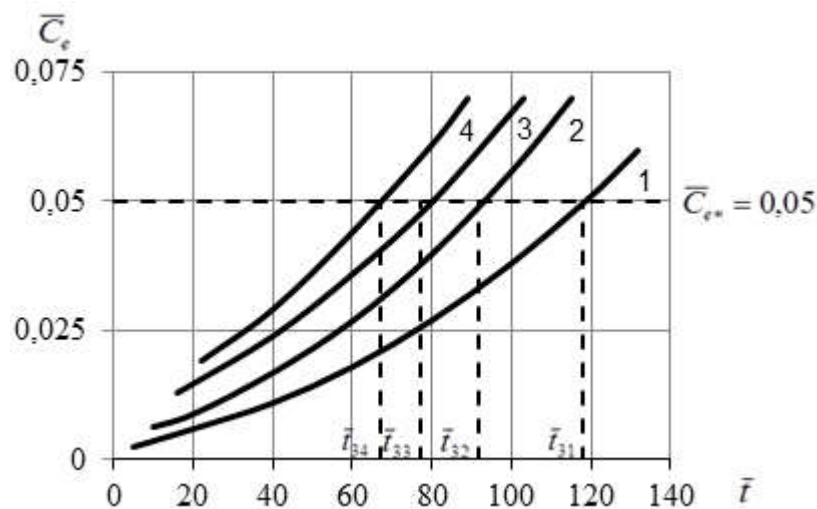


Рис. 5.4. Графік зміни з часом відносної концентрації забруднень на виході з фільтра при швидкостях фільтрування: 1.  $V_{m1} = 3$  м/год; 2.  $V_{m2} = 6$  м/год; 3.  $V_{m3} = 9$  м/год; 4.  $V_{m4} = 12$  м/год

З рис. 5.4 слідує, що відносний час, при якому буде забезпечуватися відносна гранична концентрація на виході з фільтра (відносний час захисної дії фільтра), дорівнює: при  $V_{m1} = 3$  м/год,  $\bar{t}_{P1} = 118$ ;  $V_{m2} = 6$  м/год,  $\bar{t}_{P2} = 92$ ;  $V_{m3} = 9$  м/год,  $\bar{t}_{P3} = 77$ ;  $V_{m4} = 12$  м/год,  $\bar{t}_{P4} = 67$ .

Перехід від безрозмірного часу до розмірних величин дає:

$$t_{P1} = \frac{\bar{t}_P \cdot n_0 \cdot L}{V_m} = \frac{118 \cdot 0,47 \cdot 1,2}{3} = 22,2 \text{ год,}$$

$$t_{P2} = 8,6 \text{ год; } t_{P3} = 4,8 \text{ год; } t_{P4} = 3,1 \text{ год.}$$



- При розрахунку часу захисної дії фільтра за методикою Д. Мінца використаємо формулу (1.67). При швидкості фільтрування  $V_m = 3$  м/год отримаємо

$$t_p = \frac{1}{K} \left( \frac{L}{V^{1,7} d_{ек}^{0,7}} - \frac{X_0 d_{ек}}{V} \right) = \frac{1}{1,67} \left( \frac{120}{3^{1,7} \cdot 1,15^{0,7}} - \frac{3,7 \cdot 1,15}{3} \right) = 9,2 \text{ год};$$

де  $K = 1,67$ ,  $X_0 = 3,7$  – табульовані значення констант, величина яких залежить тільки від ефекту очистки води ( $\bar{C}_{ек} = 0,05$ ).

Для різних швидкостей фільтрування буде: при  $V_m = 4$  м/год,  $t_p = 5,5$  год; при  $V_m = 5$  м/год,  $t_p = 3,7$  год; при  $V_m = 6$  м/год,  $t_p = 2,7$  год; при  $V_m = 9$  м/год,  $t_p = 1,3$  год; при  $V_m = 12$  м/год,  $t_p = 0,8$  год.

Порівняльний графік даних по розрахунку за запропонованою в роботі методикою і методикою Д.Н. Мінца приведений на рис. 5.5.

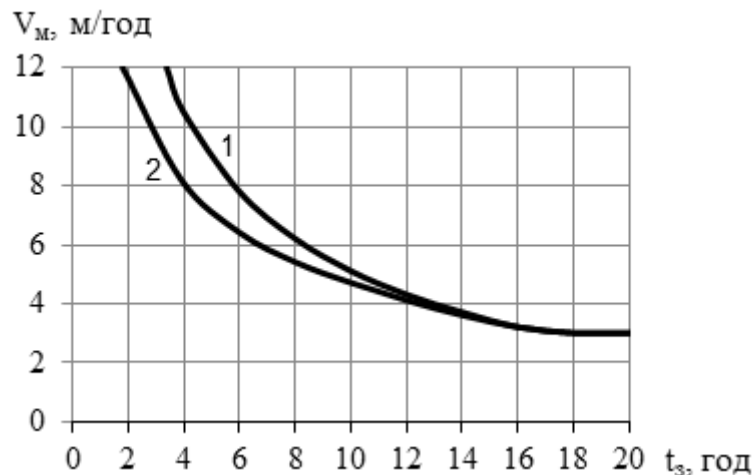


Рис. 5.5. Результати розрахунку за методикою, що пропонується (1), і за методикою Мінца (2)

З нього слідує, що вони суттєво відрізняються між собою при відносно великих швидкостях фільтрування. Починаючи зі швидкості 4 м/год і менше, дані отримані за двома методиками, практично співпадають між собою. Більші значення розрахункового часу захисної дії фільтра отримані за запропонованою в роботі методикою можна пояснити тим, що при застосуванні методики Д. Мінца, визначення коефіцієнтів прилипання і відриву забруднень здійснено на основі технологічного моделювання процесу

фільтрування, а не на основі аналітичного розв'язку математичної моделі, яка описує процес, що безумовно є суттєвим наближенням. Крім того, в запропонованому випадку враховується, що швидкість фільтрування зменшується в процесі роботи фільтра, це призводить до збільшення терміну фільтроциклу.

**Варіант 2.** Розрахувати відносну концентрацію забруднень в кінцевому перерізі швидкого фільтра для випадків змінної і постійної в часі швидкості фільтрування. Фільтр, що розглядається, має такі параметри: товщина фільтруючого завантаження  $L = 1,2$  м; коефіцієнт фільтрації чистого завантаження  $k_0 = 49$  м/год; пористість  $n_0 = 0,47$ ; початкова концентрація забруднень у воді, яка подається на очистку,  $C_0 = 50$  мг/л; коефіцієнти  $\alpha_V = 6,65$ ;  $\beta_V = 0,025$ ;  $l = 0,8$ ;  $q = 0,9$ ;  $\bar{\gamma} = 0,001$ ; розрахунки виконати для початкових швидкостей фільтрування  $V_{m1} = 3$  м/год;  $V_{m2} = 6$  м/год;  $V_{m3} = 12$  м/год.

- Переводимо розмірні величини до безрозмірного вигляду (2.45).

Приймаємо декілька значень проміжків часу роботи фільтра в інтервалі від  $t = 1$  год до  $t = 50$  год.

Розрахунок за запропонованою в даній роботі методикою для різних швидкостей фільтрування здійснюємо аналогічно розрахунку, виконаному в прикладі 1 цього розділу. Результати розрахунку приведено на рис. 5.6 (суцільні лінії).

- Розглянемо варіант розрахунку для випадку постійної швидкості фільтрування.

Концентрацію забруднень в кінцевому перерізі фільтра, в безрозмірному вигляді, для цього випадку розраховується за формулою [90]. Розрахунок починається при початковій швидкості фільтрування  $V_m = 3$  м/год і часі роботи фільтру  $t = 1$  год, маємо

$$\bar{C}_e = e^{-\alpha} \left( 2e^{\frac{\alpha\beta\bar{t}}{2+\beta\bar{t}}} - 1 \right) = e^{-6,4} \left( 2e^{\frac{6,4 \cdot 1,026 \cdot 5,3}{2+1,026 \cdot 5,3}} - 1 \right) = 0,0024.$$

Аналогічні розрахунки виконуються для інших значень швидкості фільтрування і термінів роботи споруди. Результати розрахунків також приведені на рис. 5.6 (пунктирні лінії). При розрахунках коефіцієнти прилипання ( $\alpha$ ) і відриву ( $\beta$ ) частинок забруднень приймаємо однаковими для випадків постійних і змінних в часі швидкостей фільтрування.

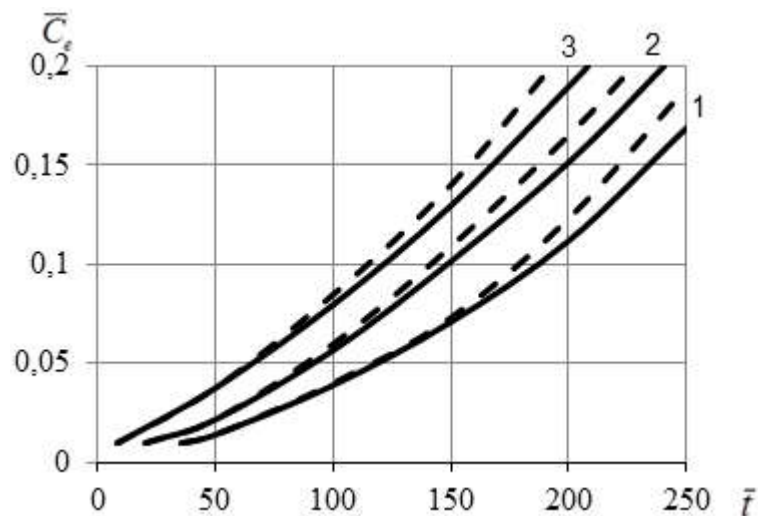


Рис. 5.6. Результати розрахунків для випадку змінних (суцільні лінії) і постійних (пунктирні лінії) швидкостей фільтрування.

1.  $V = 3$  м/год; 2.  $V = 6$  м/год; 3.  $V = 12$  м/год

Аналіз отриманих графіків показує, що результати розрахунків для двох випадків при різних швидкостях фільтрування співпадають між собою на початкових періодах роботи фільтрувальної споруди. При збільшенні терміну роботи фільтру розходження між даними розрахунків для двох випадків збільшується і може досягати значної величини (до 20 %). На величину розходження впливає швидкість фільтрування і значення коефіцієнтів прилипання  $\alpha$  і відриву  $\beta$  частинок забруднень від часток зернистого завантаження, тобто фізико-хімічні властивості матеріалу забруднень, завантаження і води, що фільтрується.

## 5.4. Висновки по розділу 5

На основі проведеного в даному розділі аналізу можна зробити такі висновки:

1. Запропоновано методику інженерного розрахунку основних характеристик швидких фільтрів, які працюють зі змінною в часі швидкістю фільтрування, з використанням сучасного програмного забезпечення ПК “Mathcad”, “Matlab”.

2. Розглянуто типові приклади розрахунку параметрів швидких фільтрів в тому числі: визначення ступеня очистки води; часу ефективної роботи фільтра (фільтроциклу), при якому буде забезпечуватись необхідна якість очистки, гранично допустимі втрати напору і рівень сирі води над завантаженням; необхідної висоти зернистого завантаження.

3. Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунку параметрів швидких фільтрів, які отримані за запропонованою в даній роботі методикою і існуючою методикою Д.Н. Мінца. Показано, що вони суттєво відрізняються між собою при швидкостях фільтрування більше 5 м/год. При швидкостях менших 4 м/год дані практично співпадають.

4. Аналогічний аналіз здійснено і за результатами розрахунків, які отримані за розрахунковими залежностями справедливими для випадків змінної і постійної з часом швидкості фільтрування. Показано, що вони близькі між собою в початкові періоди роботи. При збільшенні терміну експлуатації фільтра розходження результатів може досягати 20%.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних джерел в яких розглядаються закономірності процесу очистки води на швидких фільтрах, втрат напору в зернистому завантаженні, їх математичне моделювання, розрахунок терміну фільтроциклу і товщини фільтруючого шару.
2. На підставі проведеного аналізу обґрунтована фізична (концептуальна) модель процесу вилучення забруднень на швидких фільтрах з зернистою засипкою, в якій науково обґрунтовано доцільність і необхідність врахування змінної в часі швидкості фільтрування на загальні характеристики процесу.
3. На основі фізичної моделі обґрунтовано та побудовано загальну математичну модель прояснення суспензії фільтруванням зі змінною швидкістю, яка складається з трьох блоків: прояснювального, фільтраційного та гідравлічного, що дозволило оцінити вплив різних факторів і вихідних характеристик на процес очистки. Запропоновано методику її розв'язку.
4. Проаналізовано вплив вихідних параметрів рідини, що очищається, та основних конструктивних і технологічних характеристик розглядуваних споруд, в тому числі матеріалу фільтруючого завантаження на ефективність процесу прояснення суспензії.
5. Розроблено конструкцію системи трубопроводів для подачі і розподілу води у фільтрувальній споруді, що дозволило оптимізувати гідравлічні умови роботи даної споруди.
6. Проведено експериментальні дослідження основних параметрів, які впливають на роботу швидкого фільтра при змінній з часом швидкості фільтрування і визначено при цьому закономірності зміни ефекту очистки, втрат напору, пористості зернистого матеріалу і коефіцієнта фільтрації.
7. На основі отриманих дослідних даних із застосуванням спеціальних методик їх обробки визначено коефіцієнти і параметри, які суттєво

впливають на ефективність роботи фільтрувальних споруд, зокрема коефіцієнти прилипання  $\alpha$  і відриву  $\beta$  частинок забруднень від часток зернистого завантаження.

8. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено інженерну методику розрахунку основних конструктивних і технологічних параметрів швидких фільтрів із зернистим завантаженням, які працюють зі змінною в часі швидкістю фільтрування.
9. Здійснено апробацію запропонованої методики розрахунку, проведено практичне впровадження даних розробок при проектуванні швидких фільтрів для очистки води в робочі проекти ТОВ “Юнібуд Енерго сервіс” м. Київ, а також в проекти ТОВ “ПОБІ Вотер Інжиніринг” м. Київ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Абдурасулов А.И. Исследование фильтровальных характеристик песка из Ивановского карьера // Вестник КРСУ. – 2008, том 8, №9. – С. 164-168.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 279 с.
3. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. – М.: Гостехиздат, 1955. – 616 с.
4. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия, 1979. – 176.
5. Аюкаев Р.И. Интенсификация работы водоочистных фильтров и совершенствование метода их расчета. – Петрозаводск: Петрозаводский гос. ун-т, 1985. – 89 с.
6. Аюкаев Р.И. Теоретическое обобщение и промышленный опыт интенсификации работы водоочистных фильтров с высокопористыми материалами: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1981.
7. Басс Г.М., Грабовский П.А., Ларкина Г.М. Оптимальная продолжительность фильтроцикла скорых фильтров, работающих с падающей производительностью // Наука и техника в гор. хоз-ве. – 1978. – Вып. 38. – С.37-39.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев И.К. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1981. – 721 с.
9. Василенко А.А., Грабовский П.А. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения. – Киев – Одесса, 2008. – 308 с.
10. Венецианов Е.В. Динамика процессов очистки растворов сорбцией и фильтрованием: автореферат дис. д-ра физ.мат. наук. – М., 1986. – 48 с.
11. Венецианов Е.В., Рубинштейн Р.Н. Динамика сорбции из жидких сред. – М.: Наука, 1983. – 237 с.

12. Веницианов Е.В., Рубинштейн Р.Н., Сенявин М.М. О возможности распространения динамики сорбции на расчет осветления воды зернистыми фильтрами // ДАН СССР. – 1970. – 195, № 3.
13. Вейцер Ю. И., Колобова З.А., Сафонова Г.М. Влияние знака электрического заряда загрузки и взвешенных веществ на процесс фильтрования // Водоснабжение. Труды АКХ им. Памфилова. – М., 1974. – Вып. 98.
14. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород // Под ред. Н.Н. Веригина. – М.: Недра, 1977. – 271 с.
15. Гириков О.Г., Николаев Е.Ю. Интенсификация работы скорых водопроводных фильтров // Изв. вузов. Строительство. – 1999. - №7. – С. 128-131.
16. Горобченко А.И., Гуринчик Н.А. Применение математического моделирования процесса фильтрования с переменной скоростью для получения оптимальных режимов работы фильтровальных сооружений // Программа и тезисы докладов XXXIV научно-тех. конфер. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ. – Часть 1. – Харьков, 2008. – С. 162-165.
17. Горобченко А.И. Интенсификация работы водоочистных сооружений с зернистой загрузкой путем определения рациональных значений продолжительности фильтрования и промывки. Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Горобченко А.И. – Одесса: ОГАСА, 2008. – 183 с.
18. Грабовский П.А., Гуринчик Н.А. Математическая модель фильтрования через зернистый слой с убывающей скоростью // Коммунальное хозяйство городов. Научно-техн. сб. ХНАГХ. – К.: Техника. – 2007. – Вып. 74. – С. 230-237.
19. Грабовский П.А., Гуринчик Н.А. Фильтрование воды через зернистый слой с убывающей во времени скоростью // Вода и экология. Проблемы и решения. – 2008. – 37, № 4. – С. 3-11.



20. Грабовский П.А., Гуринчик Н.А. Численное моделирование работы фильтровальных сооружений // Вісник національного університету водного господарства та природокористування. – Вип. 4(40), ч.2, Рівне. – 2007. – С. 429-434.
21. Грабовський П.А., Гурінчик Н.О. Чисельна реалізація математичної моделі фільтрування // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Наук.-техн. зб. – К.: - 2005. – Вип. 6. – С. 4-13.
22. Грабовский П.А., Ларкина Г.М., Прогульный В.И. Промывка водоочистных фильтров. – Одесса: Optimum, 2012. – 238 с.
23. Грабовский П.А. Математические модели для задач водоснабжения и методы расчета. Вісник національного університету водного господарства та природокористування, вип. 6(40), ч.2, Рівне. -2009, с.129-134.
24. Грабовский П.А. Фильтрация воды через зернистый слой с убывающей скоростью. Доклады академии наук Украины, 2016, №8, с.40-45.
25. Гуринчик Н.А. Исследование математической модели работы скорых фильтров с падающей производительностью // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – Київ: КНУБА, 2008. – Вип. 11. – С. 44-51.
26. Гурінчик Н.О. Моделювання та розрахунки очищення води фільтруванням зі швидкістю, що спадає: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.04 “Водопостачання, каналізація”. Одеса, 2010. – 22 с.
27. Гуринчик Н.А. Определение продолжительности работы фильтров для разных режимов фильтрования // Вісник ОДАБА: зб. наук. праць. – Одеса: Оптимум, 2010. – Вип. 42. – С. 56-62.
28. ДБН В.2.5-74:2013 “Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди” // Мінрегіон України. – Київ, 2013, - 172 с.
29. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1966. – 228 с.

30. Демчик И.И., Орлов В.О., Венецианов Е.В. – Расчет технологических параметров фильтров с плавающей загрузкой // Химия и технология воды. – 1994. – 16, № 2. – С. 115-117.
31. ДержСанПіН № 136/1940. Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання. – К.: Міністерство охорони здоров'я України. – 1997. – 21 с.
32. Дерягин Б.В. Исследования по внешнему трению и прилипанию // Ж. Физ. Химии. – 1935. – Т.6, вып. 10. – С. 1306 – 1319.
33. Епоян С.М., Колотило В.Д. Водопостачання та очистка природних вод. Навч. Посібник. – Харків: Фактор, 2010. – 192 с.
34. Эпоян С.М., Благодарная Г.И., Душкин С.С., Сташук В.А. Повышение эффективности работы сооружений при очистке питьевой воды: монография. – Харьков: ХНАГХ, 2013. – 190 с.
35. Эпоян С.М., Душкин С.С. Влияние обработки воды активированным раствором коагулянта на параметры фильтрования воды на скорых фильтрах // Комунальне господарство міст. – 2013, №109. – С. 65-72.
36. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. – 4 – е изд., перераб. И доп. – Москва, Химия, 1980. – 400 с.
37. Журба М.Г. Водоочистные фильтры с плавающим фильтрующим слоем: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1986.
38. Журба М.Г. Очистка воды на зернистых фильтрах / М.Г. Журба. Львов: Вища школа, 1980. – 200 с.
39. Закон України “Про питну воду та питне водопостачання” //Офіційний вісник України, 2002. - № 6. – С.1.
40. Избаш С.В. Фильтрационные деформации грунта // Изв. НИИГ. – 1933. – Т. 10. – С. 189 – 218.
41. Инструкция по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. – М.-Л.: Энергия, 1965. -97 с.
42. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1971. – 576 с.

43. Кастальский А.А., Минц Д.М. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения. – М.: Высшая школа, 1962. – 558 с.
44. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод // М.: Издательство литературы по строительству. – 1971. – 574 с.
45. Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М., Рода И.Г. Адсорбция органических веществ из воды. – Л.: Химия, 1990. - 256 с.
46. Колотило В.Д., Орлов В.О. Зернистые фильтры для подготовки питьевой воды. – Харьков, Издательский дом "Фактор" – 2004 – 256 с.
47. Кравцов М.Л. Гидравлика зернистых материалов. – Минск: Наука и техника, 1980. – 168 с.
48. Кравчук О.А. До зміни гідравлічних характеристик зернистого завантаження фільтрів в процесі їх роботи // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2016. – Вип. №2 (84). – С. 316 – 319.
49. Кравчук О.А. До розрахунку дії параметрів швидкого фільтра при істотній зміні швидкості фільтрування // Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 63. – С. 215-221.
50. Кравчук О.А. Дослідження гідравлічного опору завантаження фільтрів // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2016. – Вип. 27. – С. 208 – 213.
51. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження втрат напору під час роботи швидкого фільтра зі змінною з часом швидкістю фільтрування // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. . К.: КНУБА, 2017 – Вип. 89. – С. 56-62.
52. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження зміни швидкості фільтрування під час роботи швидкого фільтра // Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 64. – С. 135-141.
53. Крыштул В.П. Исследование задерживающей способности кварцевых фильтров городских водопроводных станций. Автореф. канд. дисс. М., АКХ, 1951, 18 с.

54. Куликов Н.И., Найманов А.Я., Омельченко Н.П., Чернышев В.Н. Теоретические основы очистки воды. – Макеевка: Издательство “Ноулидж” донецкое отделение, 2009. – 298 с.
55. Кульский Л.А., Строкач П.П. Технология очистки природных вод. – К.: Вища школа, 1986. – 352 с.
56. Кургаев Е.Ф. Осветлители воды. – М.: Стройиздат, 1977. – 192 с.
57. Кургаев Е.Ф. Пристеночный эффект в моделях осветлителей и фильтров // Водоснабжение и санит. техн. – 1971. - №9. – С. 4-7.
58. Ларкина Г.М. Исследование продолжительности фильтроцикла скорых фильтров, работающих с падающей скоростью, и режима водовоздушной промывки. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, - Одесса: 1975.
59. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. – Л.: Энергия, 1967. - 235 с.
60. Мацкрле В. Исследование влияния прилипания в пористой среде. – Прага: АН ЧССР, 1961. 189 с.
61. Мацкрле С.Л. Исследование процессов адгезии взвешенных веществ в зернистом фильтре, применительно к процессам очистки воды. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. Наук. – М., 1956.
62. Меддур М.М. Фізична властивість осаду та його видалення із фільтруючої засипки // Вісник Нац. університету водного господарства та природокористування. – Рівне, 2013. – Вип. 1 (61). С. 92-98.
63. Мельцер В.З. Исследование гидравлического сопротивления водоочистительных фильтров в процессе коагуляции. Автореф. канд. дисс. М., АКХ им. К.Д. Памфилова, 1971 – 20 с.
64. Минц Д.М., Мельцер В.З. Упрощенный метод технологического моделирования процесса фильтрования // Науч. труды АКХ им. К.Д.
65. Минц Д.М. Теоретические основы технологи очистки воды. М.: Стройиздат, 1964. – 156 с.

66. Минц Д.М., Шуберт С.А. Гидравлика зернистых материалов. М.: Издательство министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1955. – 102 с.
67. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. / Пер. с англ. - М.: Мир, 1981. - 520 с.
68. Налимов В.В. Планирование эксперимента. В сб. Планирование эксперимента. - М.: Наука, 1966. - 243 с.
69. Нестер А.А., Демчик С.П. Модель фильтрования // Вестник Нац. техн. ун-та “ХПИ”: сб. науч. тр. Темат. вып. : Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ “ХПИ”. – 2012. – № 18. – С. 103-107.
70. Нестер А.А., Демчик С.П. Фільтрування через пористі середовища із спадною швидкістю // Вимірювальна та обчислювальна техніка. – 2012. – №2. – С. 41-45.
71. Носков М.Д., Зайцева М.С., Истомина А.Д., Лукашевич О.Д. Математическое моделирование работы скорых фильтров. – Вестник ТГАСУ № 2, 2008.
72. Оводов В.С. Автоматический медленный фильтр для сельскохозяйственного водоснабжения. – М.: Издательство сельскохозяйственной литературы, журналов и плакатов, 1963. – 96 с.
73. Оводов. В.С., Чудновский С.М. Вопросы исследования электрокинетической характеристики мутных вод // Труды НИМИ Новочеркасск. – 1970. – т. 12, вып. 5.
74. Олійник О.Я., Величко С.В., Пачковська К.В. Розрахунок параметрів очисних фільтрів в умовах утворення осаду на його поверхні // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – Київ: КНУБА, 2009. – Вип. 12. – С. 25-36.
75. Олійник О.Я., Калугін Ю.І. Деякі результати теоретичних досліджень процесів масообміну в пористих середовищах // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – Київ: КНУБА. – 2010. – № 5. – С. 100–112.

76. Олейник А.Я., Поляков В.Л. Теоретические исследования фильтрационных процессов в пористых средах с изменяющимися водно-физическими свойствами // Прикладна гідромеханіка. – 2007. – Том 9, №2-3. – С. 122-138.
77. Олійник О.Я., Сорокін С.М. Моделювання фільтрування неоднорідної суспензії з утворенням шару осаду // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – Київ: КНУБА, 2006. – Вип. 6. – С. 95-103.
78. Олейник А.Я., Тугай А.М. Моделирование процессов кольтматажа и суффозии в прифилтровой зоне скважины // Доклады НАН Украины. – 2001. – № 9. – С. 190 – 194.
79. Орлов В.О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою. – Рівне: НУВГП, 2005. – 163 с.
80. Павловский Н.Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее приложения. Изд. Научно-мелиорац. Ин-та, 1922. – 210 с.
81. Патрашев А.Н. Напорное движение грунтового потока сопровождающееся выносом мелких частиц грунта // Изв. НИИГ. – 1938. – Т.22. – С. 5 – 49.
82. Поляков В.Л., Кравчук О.А. Математическое моделирование осветления суспензии фильтрованием с существенно переменной скоростью // Вісник ОДАБА. – Одеса: Optimum, 2015. – Вип. 59. – С. 228 – 235.
83. Поляков В.Л., Кравчук О.А. О гидравлике водоочистных безнапорных фильтров на начальных стадиях фильтрования // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2015. – Вип. 25. – С. 223 – 231.
84. Поляков В.Л. Моделирование осветления суспензий в зернистых загрузках при нелинейной фильтрации // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. Сб. – К.: Техніка. – 2007. – Вип. 74. – С. 222-230.

85. Поляков В.Л. О влиянии высоты загрузки и скорости фильтрования на осветление суспензии // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2007. – Вип.. 9. – С.131-141.
86. Поляков В.Л. О влиянии сортировки зерен при эксплуатации загрузки на ее эффективность // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. – Київ: КНУБА, 2009. – Вип. 12. – С. 103-113.
87. Поляков В.Л. О математическом моделировании и инженерных расчетах осветления суспензии фильтрованием с учетом структуры осадка // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2009. – Вип. 13. – С. 109-119.
88. Поляков В.Л. О прогнозе динамики потерь напора в загрузке фільтра // Доповіди Національної академії наук України. – 2010. №3. С. 70-76.
89. Поляков В.Л. Осветление суспензии фильтрованием с убывающим расходом // Доповіди НАН України. – 2010. № 5. С. 57- 63.
90. Поляков В.Л. О фильтровании суспензии при заданном напоре // Доп. НАН Украины. – 2005. - № 4, - С. 48-54.
91. Поляков В.Л. О фильтровании суспензии при начальном загрязнении загрузки (линейная кинетика массообмена) // Доп. НАН України. 2006. - № 10. – С. 65-71.
92. Поляков В.Л. Теоретический анализ длительности фильтроцикла // Химия и технология воды. – 2009. – 31, № 6. С. – С. 605-618.
93. Поляков В.Л. Фильтрование суспензий с убывающей скоростью при линейной кинетике массообмена // Химия и технология воды. 2012. – т. 34, № 2. – С. 107-130.
94. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука. 1972. - 440 с.
95. Сенявин М.М., Венецианов Е.В., Аюкаев Р.И. О математических моделях и инженерных методах расчета процесса очистки природных вод фильтрованием // Водные ресурсы, 1977. - № 2. – С.157-170.

96. Сысоев М.Н., Казакова Л.П., Богданова С.И., Круглов Л.С. Работа фильтрующих сооружений с переменной скоростью // Водоснабжение и санитарная техника. – 1968, - №2. – С. 23-27.
97. Сивухин Д.В. Оптика: Учеб. пособие. – 2-е издание испр. – М: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 752 с.
98. Сиденко В.М., Грушко И.М. Основы научных исследований. Уч. пособие для вузов. Х.: 1979, 199 с.
99. Смилка Е.П. Повышение эффективности работы скорых фильтров на очистных сооружениях водопровода // Коммунальное хозяйство городов. Научно-техн. сб. ХНАГХ. – К.: Техника, 2010. – Вып. 93. – С. 348-352.
100. Сторчак В.А. Сучасні інноваційні заходи щодо покращення господарсько-питного водопостачання // Водне господарство України, №3, - 2012. С. 46-47.
101. Тугай А.М., Орлов В.О. Водопостачання. – К.: Знання, 2009. – 735 с.
102. Тусев Е.М. Экспериментальные исследования напорного впитывания. – В кн.: физика почвенных вод. – Москва: Наука. – 1981. – С.195-205.
103. Фоминых А.М. Интенсификация процессов разделения суспензий в технологии очистки природных вод: Автореф. дис. д-ра техн. Наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1984.
104. Фоминых А.М. К теории очистки воды фильтрованием // Изв. вузов. Строительство. – 1998. - №2. – С. 84-87.
105. Фоминых А.М. Математическая модель процесса очистки воды фильтрованием и ее практическое применение // Водные ресурсы. – 1980. – № 3.
106. Фоминых А.М., Моргунов А.В. Определение гидравлических и геометрических параметров при разделении суспензий фильтрованием через зернистые материалы // Изв. вузов. Строительство. – 1999. - №1. – С. 72-76.



107. Фоминых А.М. Определение гидравлического сопротивления фильтров в процессе их кольтматации // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. – 1977. №7.
108. Фоминых А.М. Определение предельных потерь напора скорых фильтров // Межвуз. сб. науч. тр. ЛИСИ. – 1976. - №4.
109. Фоминых А.М. Теоретическое определение предельного гидравлического уклона скорых фильтров и контактных осветлителей // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. – 1977. №1.
110. Фоминых А.М., Фоминых В.А., Кантор Л.И. К вопросу определения предельного гидравлического уклона в процессе очистки воды фильтрование // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. – 1992. - №1. С. 92-94.
111. Фоминых А.М., Фоминых В.А. Применение теории фильтрации в инженерных расчетах // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995. - №1. – С. 19-20.
112. Хапуп Т.Ф., Мильтрейгер И.М. О математических моделях и инженерных методах расчета процесса очистки природных вод фильтрованием // Водные ресурсы. – 1981. – №3.
113. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. – 381с.
114. Шехтман Ю.М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий / Ю.М. Шехтман. – М.: Изд.-во АН СССР, 1961. – 212 с.
115. Шуберт С.А. Гидравлика зернистых материалов. – М.: Издательство Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1955. – 110 с.
116. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. – М.: Гостоптехиздат, 1949. – 525 с.
117. Ярошевская Н.В., Андриевская М.Д., Швиденко О.Г., Кульский Л.А. Очистка воды фильтрованием с нестационарным изменением скорости // Химия и технология воды. – 1989. – т. 11, №3. – С. 251 – 253.

118. Ярошевская Н.В., Кульский Л.А. Метод расчета фильтровальных сооружений, работающих с убывающей скоростью // Химия и технология воды. – 1985. – 7, №2. – С. 3-5.
119. Ярошевская Н.В., Муравьев В.Р. Сопоставительная оценка загрузок водоочисных фильтров // Химия и технология воды. – 2002. – 24, №1. – С. 71-79.
120. Adin A., Rebhun M.A. Model Predict Concentration and Head – Loss Profiles in Filtration // Journal AWWA. – 1977.
121. Akgiray O., Saatci A.M. An algorithm for bank operation of declining rate filters // Water Res. – 1998. – 32, No 7. – P. 2095-2105.
122. Arboleda J., Giraldo R., Snel H. Hydraulic behavior of declining rate filtration // Journal American Water Works Association. – 1985. – vol. 77. No 12. – P. 67-74.
123. Boller M.A., Kavanaugh M.C. Particle characteristics and headloss increase in granular media filtration // Water Res. – 1995. – vol. 29, No 4. – P. 1139-1149.
124. Campbell Rehman, L.L., Welty, C., and Harvey, R.W. Stochastic analysis of virus transport in aquifers // Water Resources Research – 1999, Vol. 35, №7, p. 1987-2006.
125. Camp T.R. Theory of water filtration // Journal Sanit. Engng. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. – 1964. – vol. 90. – P. 1-30.
126. Charlls S., Oulman E., Albert Bauman. Streaming Potentials in Diatomite Filtration of Water. – awwa, 1964, № 56.
127. Chaundry F.H. Theory of declining rate filtration. I. Continuous operation // Journal of Environ. Eng. Din. ASCE. – 1987. – 113(4). – P. 834-851.
128. Cleasby J.L., Di Bernardo L. Hydraulic considerations in declining –rate filtration // Journal of the Environmental Engineering Division. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. – 1980. – Vol. 106, No EE6. – P. 1043-1055.
129. Cleasby J.L. Water filtration through deep granular media // Public Works. – 1970. No6. – P. 36-45.

130. Cornwel D.A., Bishop M.M., Dunn H.J. Declining rate filters: regulatory aspects and operating results // Journal American Water Works Association. – 1984. – Vol. 76, No 12. – P. 55-61.
131. Dagan G., Indelman P. Reactive solute transport inflow between a recharging and a pumping well in a heterogeneous aquifer // Water Resour. Res. – 1999. – 35, №12. – P. 3639 – 3647.
132. Deb A.K. Theory of sand filtration // Journal of the Sanitary Engineering Division. – 1969. – St. 3.
133. Elric D.E., Parkin G.W., Reynolds W.D., Fallow D.J. Analysis of early-time and steady-state single ring infiltration under falling head conditions // Water Resour. Res. – 1995.-31.-P.1883-1893.
134. Gross M.J., Albinger O., Jewett D.G., Zogan B.E., Bales R.C., Arnold R.G. Measurement of bacterial collision efficiencies in porous media // Water Res. – 1995, Vol. 29, №4. – P. 1151-1158.
135. Harvey R.W., Garabedian S.P. Use of colloid filtration theory in modelling movement of bacteria through a contaminated sandy aquifer // Envir. Sci. Technol. – 1991, Vol. 25. – P. 178-185.
136. Hudson H.E. Declining rate filtration // Journal American Water Works Association. – 1959. – vol. 51. – No 11. – P. 42-50.
137. Hsu B.-M., Huang C., Pang R. Filtration behaviors of giardia and cryptosporidium-ionic strength and pH effects //Water Res. – 2001, Vol. 35, №16. – P. 3777 – 3782.
138. Huang C., Pan J.R., Huang S. Collision efficiencies of algae and kaolin in depth filter: the effect of surface properties of particles // Water Res. – 1999, Vol. 33, №5. – P. 1278-1286.
139. Hunter R.Y., Alexander A.E., Surface Properties and then Behavior of caolinite. – Journal of colloid Science, 1963, t. 18, № 9.
140. Ives K. J. Filtration the Significance of theory. – Just of Water Engineering, 1971, 25, №1.

141. Ives K.J. International Expert Present a Modern Theory of Water Filtration and Separation. January / February. 1967.
142. Ives K.J. Mathematical models of deep bed filtration. In The Scientific Basis of Filtration (Edited by Ives K.J.). Noordhoff International, Leyden, 1975.
143. Ives K. J. Theory of Filtration. Special Subject // London Inst. Water Supply Assoc. – 1969. – №7. – P. 3 – 28.
144. Iwasaki T., Slade Jr. J.J., Stanley Wm. E. 1937. Some notes on sand filtration. J. // Am. Water Works Ass. 29(10). – P. 1591–1602.
145. Jegatheesan V., Vigneswaran S. Deep bed filtration: mathematical models and observation // Environ. Science and Technology. – 2005. – vol. 35. – P. 515-569.
146. Kozeny J. Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. // Sitzungsber Akad. Wiss., Wien, 136(2a), 1927. – P. 271-306.
147. Kravchuk O. Functioning of filter structures in changing velocity conditions over time // Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія. К., 06/2017. – С. 65-73.
148. Marckle V. The theory of rapid Filtration. International Water Supply Congress. Barselona, 1966.
149. McDowell L.M., Hunt J.R., Sitar N. Particle transport through porous media // Water Resour. Res. – 1986. – 22, No 13. – P. 1901-1921.
150. Mohanka S.S. Theory of Multilayer Filtration // J. of the Sanit. Eng. Div. – 1969. – V. 95, №6.
151. Neuman S.P. Hydraulic head at the wetting front in the Green-Ampt model // Water Resour. Res. – 1976.-12.-P.564-566.
152. Ojha C., Graham N. Theoretical estimates of bulk specific deposit in deep bed filters // Water Res. – 1993. – vol. 27, No. 3. – P. 377-389.
153. O'Melia C.R., Ali W. The role of retained particles in deep bed filtration // Prog. Wat. Technol. – 1978. – vol. 10. – P. 167-182.
154. Rebhun M., Fuhrer Z., Adin A. Contact flocculation-filtration of humic substances // Water Res. – 1984. vol. 18, No 3. – P. 964-970.

155. Ren J., Packman P. Correlation of colloid collision efficiency with hydraulic conductivity of silica sands // *Water Resour. Res.* – 2000. – 36, №9. P. 2493 – 2500.
156. Sabale R., Mujawar S. Improved rapid sand filter for performance enhancement. // *International Journal of Science and Research* – 2014, Vol. 3, No 10. – P. 1031-1033.
157. Saiers J., Hornberger G., Ziang Z. First- and second-order kinetics approaches for modeling the transport of colloidal particles in porous media // *Water Resour. Res.* – 1994. – 30. №9. – P.2499 – 2506.
158. Song Z., Elimelech M. Dynamics of colloid deposition in porous media: modeling the role of retained particles // *Colloids Surf.* – 1993. – 73, №1. – P. 49 – 63.

## **ДОДАТКИ**

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Kravchuk O. Functioning of filter structures in changing velocity conditions over time // Underwater technologies. Industrial and civil engineering (Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія). К., 2017. – Вип. 6. – С. 65-73.

2. Поляков В.Л. Математическое моделирование осветления суспензии фильтрованием с существенно переменной скоростью. / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Вісник ОДАБА. – Одеса: Optimum, 2015. – Вип. 59. – С. 228 – 235.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в проведенні порівняльного аналізу запропонованої і існуючих фізичних і математичних моделей, які описують роботу фільтрів зі змінною в часі швидкістю фільтрування.

3. Поляков В.Л. О гидравлике водоочистных безнапорных фильтров на начальных стадиях фильтрования / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2015. – Вип. 25. – С. 223 – 231.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в аналізі розрахункових залежностей і графіків та оцінці факторів, які впливають на характер роботи споруд в початкові періоди фільтрування.

4. Кравчук О.А. До зміни гідравлічних характеристик зернистого завантаження фільтрів в процесі їх роботи // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2016. – Вип. №2 (84). – С. 316 – 319.

5. Кравчук О.А. Дослідження гідравлічного опору завантаження фільтрів // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2016. – Вип. 27. – С. 208 – 213.

6. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження зміни швидкості фільтрування під час роботи швидкого фільтра Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 64. – С. 135-141.

7. Кравчук О.А. До розрахунку дії параметрів швидкого фільтра при істотній зміні швидкості фільтрування // Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 63. – С. 215-221.

8. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження втрат напору під час роботи швидкого фільтра зі змінною з часом швидкістю фільтрування // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. К.: КНУБА, 2017 – Вип. 89. – С. 56-62.

9. Поляков В. Л. Теоретические исследования технологических и конструктивных параметров при фильтровании с изменяющейся во времени скоростью / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Чиста вода. Фундаментальні, практичні та промислові аспекти. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. – К.: НТУУ “КПІ”, 2015. – С. 167 – 170.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в проведенні математичних розрахунків параметрів фільтрації при роботі споруд зі змінною швидкістю.

10. Поляков В.Л. Розрахунок освітлення слабokonцентрованої суспензії на швидких фільтрах при значній зміні з часом швидкості фільтрування / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Матеріали 71-ї науково-технічної конференції. 15-17 березня 2016 р. – Харків: ХНУБА, 2016. – С. 37.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає у виконанні розрахунків розглянутих споруд при різних параметрах очищуваної рідини.

11. Поляков В.Л. Про деякі результати теоретичних і експериментальних досліджень дії водоочисних фільтрів при змінній з часом швидкості фільтрування / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Тези за матеріалами VII Всеукраїнського наукового семінару “Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур”. 11-12 жовтня 2016 р. – Харків: ХНУБА, 2016. – С. 18-20.

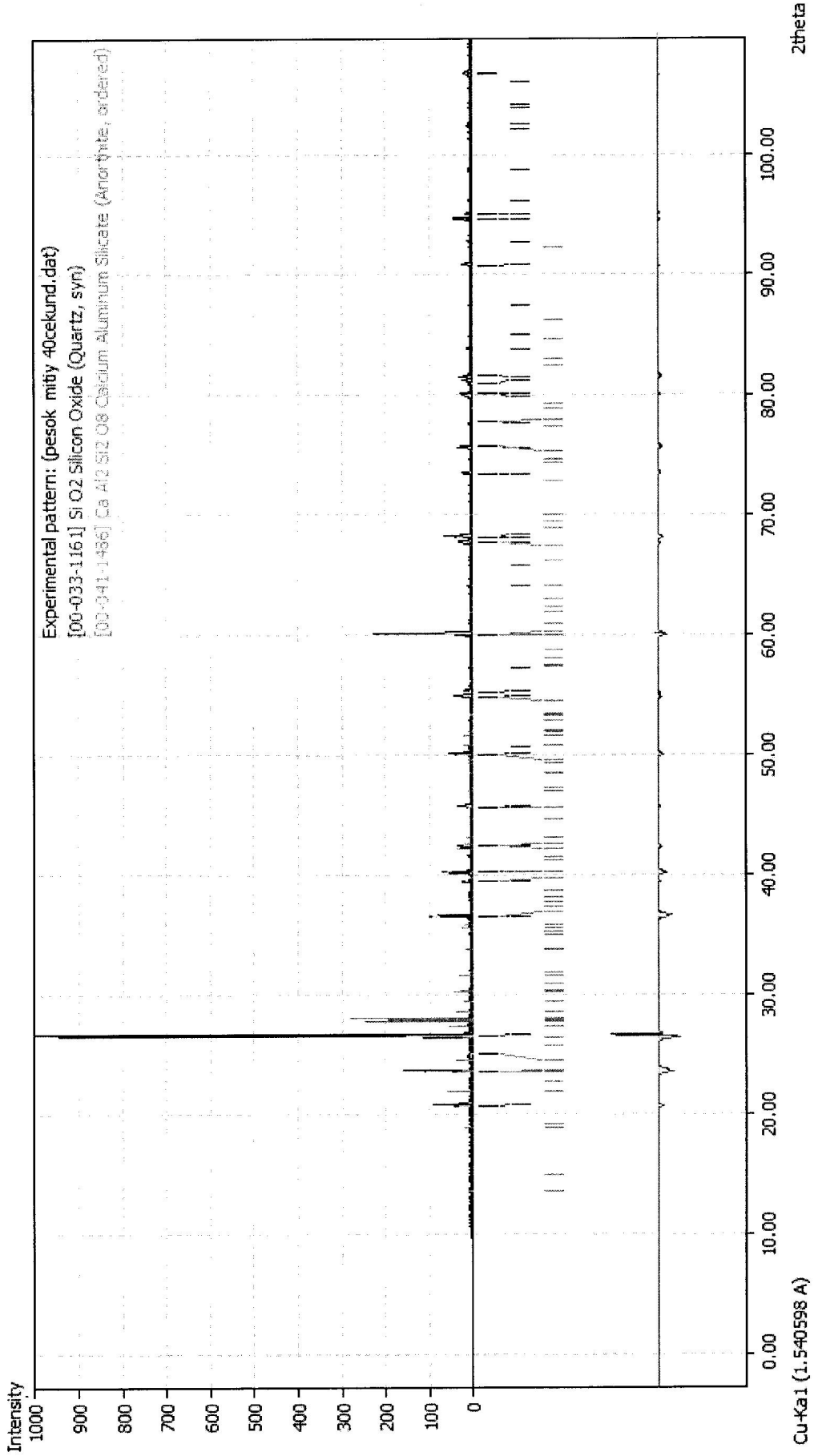
Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в обробці даних існуючих експериментальних досліджень і порівнянні їх з результатами розрахунків.

12. Патент України на винахід №112509. Фільтр для очищення води / Юрков Є.В., Кравчук О.А., Юрков О.Д.; заявл. 28.09.2015; Опубл. 12.09.2016, Бюл. №17.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в розробці конструкції системи трубопроводів для подачі і розподілу води у фільтрувальній споруді.



Додаток Б

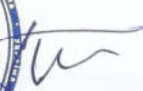


Діаграма рентгенофазового аналізу кварцового піску



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ  
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ  
"ПОБІ ВОТЕР ІНЖИНІРИНГ"  
03113, Україна, Київ  
вул. Дружківська, 12, оф. 9  
(044) 2251065  
+380666505559 +380936648516  
**www.pobi.com.ua**  
pobiwater@gmail.com



Директор  
ТОВ «ПОБІ ВОТЕР ІНЖИНІРИНГ»  
  
Боковня І.М.

**АКТ**  
**про впровадження результатів науково-дослідної роботи Кравчука О.А.**  
**«Фільтрування рідини зі змінною швидкістю руху потоку» в проектах**  
**ТОВ «ПОБІ Вотер Інжиніринг»**

Комісія у складі: представника ТОВ «ПОБІ Вотер Інжиніринг» технічного директора Поліщука О.В. та представників Київського національного університету будівництва і архітектури професора кафедри водопостачання та водовідведення, д.т.н. Полякова В.Л. та аспіранта кафедри водопостачання та водовідведення Кравчука О.А. склали акт на предмет того, що наукові розробки аспіранта Кравчука О.А., які є частиною його кандидатської дисертації, були використані та впроваджені в проектах ТОВ «ПОБІ Вотер Інжиніринг».

Результати досліджень аспіранта Кравчука О.А. було використано при проектуванні швидких фільтрів, які працюють зі змінною в часі швидкістю фільтрування, з метою підвищення ефективності та надійності їх роботи. Запропонована методика розрахунку даних споруд дозволяє більш точно визначити тривалість фільтроциклу, раціональну висоту фільтруючого завантаження, а також, швидкість фільтрування, ефект очистки, рівень води над завантаженням у будь-який момент часу при різних початкових умовах. Вказані заходи дозволяють покращити умови та економічну ефективність експлуатації даних споруд.

Технічний директор  
ТОВ «ПОБІ Вотер Інжиніринг», к.т.н.



Поліщук О.В.

Професор кафедри водопостачання та  
водовідведення КНУБА, д.т.н.



Поляков В.Л.

Аспірант кафедри водопостачання та  
Водовідведення КНУБА



Кравчук О.А.

**ТОВ «ЮНІБУД ЕНЕРГО СЕРВІС»**

02002, м. Київ, вул. Р. Окіпної 4А, оф.137  
 Тел: (044) 353-41-43, Факс: (067) 231-93-06  
 E-mail: [unibud@ukr.net](mailto:unibud@ukr.net)  
 Ліцензія АЕ № 280676

**LLC "UNIBUD ENERGY SERVICE"**

02002, Kyiv, R. Okipnoyi Str.4A, office 137  
 Tel: (044) 353-41-43, Fax: (067) 231-93-06  
 E-mail: [unibud@ukr.net](mailto:unibud@ukr.net)  
 License AE № 280676

Р/р № 26006267771 в АТ «Райффайзен Банк Аваль», МФО 380805, ЄДРПОУ 35363871,  
 Свідоцтво платника ПДВ № 100065122, індивідуальний податковий № 353638726563

Затверджую

Генеральний директор

ТОВ «Юнібуд Енерго Сервіс»

2017 р.

Гайворонський Ю.В.

**АКТ**

про впровадження результатів науково-дослідної роботи О. А. Кравчука

«Фільтрування рідини зі змінною швидкістю руху потоку»

в проектах ТОВ «Юнібуд Енерго Сервіс»

Комісія в складі: представника ТОВ «Юнібуд Енерго Сервіс» технічного директора Лапіна Євгена Миколайовича і представників Київського національного університету будівництва та архітектури професора кафедри водопостачання та водовідведення д.т.н. Таварткіладзе І.М. і аспіранта кафедри водопостачання та водовідведення Кравчука О.А. склали акт на предмет того, що наукові розробки аспіранта Кравчука О.А., які є частиною його кандидатської дисертації, були використані та впроваджені в проектах ТОВ «Юнібуд Енерго Сервіс»

Результати досліджень аспіранта Кравчука О.А. було використано при розробці робочого проекту №01.12.11-15 «Біологічні очисні споруди для Новосільського обласного спеціального навчально-виховного комплексу Підволочівського району Тернопільської обл.» та робочого проекту №1.27.10-15 «Реконструкція очисних споруд м. Шумська, Тернопільської обл.», згідно яких були реконструйовані та запуснені в роботу очисні споруди до складу яких входять фільтри зі змінною швидкістю руху потоку, що забезпечують ефективність роботи, по даним СЕС 85-90%.

Технічний директор  
 ТОВ «Юнібуд Енерго Сервіс»

Лапін Є.М.

Професор кафедри водопостачання  
 та водовідведення КНУБА, д.т.н.

Таварткіладзе І.М.

Аспірант кафедри водопостачання  
 та водовідведення КНУБА

Кравчук О.А.