

## INCREASING THE EFFICIENCY OF HORIZONTAL SEPARATORS WITH THIN-LAYER MODULES

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ВІДСТІЙНИКІВ З ТОНКОШАРОВИМИ МОДУЛЯМИ

Для вирішення проблем охорони навколишнього середовища та захисту водних об'єктів у сучасних умовах велике значення має раціональне використання водних ресурсів та зниження грубодисперсних та колоїдних забруднень шляхом застосування фізико-хімічних технологій, до яких належить прояснення води у горизонтальних відстійниках.

Особлива увага приділяється інтенсифікації процесів очищення природних вод, удосконаленню технологій та розробці нових ефективних методів очищення, впровадженню ресурсозберігаючих технологій. При цьому досягнення практичних результатів можливе завдяки підвищенню ефективності роботи окремих споруд комплексів систем водопостачання, одним з найважливіших елементів яких є горизонтальні відстійники<sup>89</sup>.

Аналіз існуючих методів інтенсифікації водообробки свідчить про те, що найперспективнішими є методи, пов'язані із застосуванням раціональних, технологічно обґрунтованих схем, модернізацією існуючих та розробкою нових методів та конструкцій водоочисних апаратів. Все більшого значення набувають фізичні методи, до яких належить аналізований у цій роботі метод інтенсифікації процесу прояснення води у горизонтальних відстійниках з тонкошаровими елементами із застосуванням модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію. Цей метод дозволяє збільшити продуктивність очисних споруд, знизити витрату реагенту, що використовується при очищенні води без погіршення якості останньої, зрештою, – знизити собівартість очищення<sup>90</sup>.

Метод інтенсифікації процесу прояснення води у горизонтальних відстійниках з тонкошаровими елементами із застосуванням модифікованого розчину коагулянту пройшов апробацію, технологічні прийоми та конструктивні рішення для їх реалізації захищені патентами України № 54932 А, № 4552, 103295.

*Фізико-хімічні основи процесу прояснення води у тонкошарових відстійниках.* В технології очищення води велика увага приділяється відстійникам, так як від ефективності їх роботи залежить продуктивність фільтрів, окисних баків, апаратів з ущільнення та зневоднення осадів, дозуючих і перемішуючих пристроїв та ряд інших споруд. У багатьох випадках відстійники є єдиною спорудою для очищення води.

Останнім часом при очищенні води все ширше використовуються відстійники з тонкошаровими елементами. Їх роздільна здатність, особливо при виділенні тонкодисперсних домішок, у багато разів вище розділової здатності горизонтальних, вертикальних та радіальних відстійників. Габарити тонкошарових відстійників у порівнянні з іншими осадовими басейнами значно менше та обчислюються кількома метрами, що дозволяє розміщувати їх у закритих приміщеннях. Це в свою чергу підвищує ефект відстоювання, оскільки процеси осідання зависі протікають за більш високих і стабільних температур<sup>91</sup>.

Розподіл зависі відбувається за умови нерівності густини твердого тіла  $\rho$  і рідини  $\rho_0$ , в якій воно знаходиться. При позитивному значенні різниці щільностей ( $\rho - \rho_0 > 0$ ) частинки осідають, при негативному ( $\rho - \rho_0 < 0$ ) спливають, що є основним для рівнянь Ньютон-Ретингера, Стокса та інших при визначенні швидкості осідання твердих частинок у в'язкій рідині.

<sup>89</sup> Булгакова О. В. (2010). Фізико-хімічні основи освітлення води в горизонтальних отстойниках с тонкослойными элементами. Техника, 93. с. 330.

<sup>90</sup> Dushkin S., Martynov S., Dushkin S. (2019). Intensification of the work of contact clarifiers of drinking water preparation. Journal of Water and Land Development, 41 (IV-VI), p. 57.

<sup>91</sup> Демур М. В. (1963). Горизонтальные отстойники, с. 19.

У роботах про поверхневі явища вказується на утворення навколо твердої частинки, зануреної у воду, іммобілізованого шару рідини, характерного тим, що він з частинкою утворює єдиний агрегат, товщина іммобілізованого шару у якого змінюється від 0,03 мкм до 0,4 мкм і становить у середньому близько 15 мкм. Це становище є важливим при оцінці осідання частинок мікрогетерогенної системи, розмір яких становить від 0,1 до 10 мкм, тобто зависі, що піддається розрахункам за рівнянням Стокса.

Доцільність застосування тонкошарових відстійників ґрунтується на тому, що зменшення висоти потоку при збереженні тієї ж швидкості його руху пропорційно зменшує і час відстоювання.

Контактне середовище у відстійниках являє собою завислий висхідним потоком води шар частинок, що складається з продуктів процесу водообробки. Зазвичай ці частинки мають вигляд пластівців із сітчастою структурою, скелет (каркас) якої утворений твердою речовиною, а осередки містять велику кількість води.

Частинки підтримуються в завислому стані гідродинамічним тиском висхідного потоку води і разом з водою, що їх розділяє, утворюють гетерофазну систему.

Ефективність впливу контактного середовища на процес обробки води у відстійнику залежить від фізичних параметрів середовища: об'ємної концентрації, розмірів частинок, сил зчеплення і гідравлічної характеристики зависі, що утворює середовище. Крім того, для роботи відстійника велике значення мають міцність на стиск і об'ємну вагу зависі та ступінь її структурно-механічної гідратації.

Наявність у воді механічних домішок дуже впливає на фізичні параметри коагульованої зависі. У міру збільшення вмісту домішок зростають щільність, міцність на стиск і швидкість осідання частинок, а кількість води, що міститься в осередках структури зависі, різко зменшується.

Безпосередній вплив на фізико-хімічні процеси очищення води надають об'ємна концентрація, розмір та сила зчеплення зависі контактного середовища. Перші два параметри визначають площу твердої поверхні, з якою контактує оброблювана вода і пов'язані явища каталізу, сорбції та адгезії. Крім того, від об'ємної концентрації залежить інтенсивність явищ циркуляції і дифузії зависі, що впливають на фізико-хімічні процеси очищення води і зумовлюють динамічну рівновагу контактного середовища та процес видалення з неї надмірної зависі.

Гідравлічна характеристика зависі визначає швидкість осідання та ступінь однорідності зависі. Від неї залежить швидкість руху води у відстійнику і, отже, його пропускна здатність.

За результатами визначення фізичних параметрів контактного середовища можна підібрати оптимальний режим роботи горизонтального відстійника, який залежить від таких факторів як: ступеня структурно-механічної гідратації коагульованих домішок, питомої ваги та зчеплення їх з контактним середовищем.

*Використання тонкошарових відстійників в процесах очищення води.* Для інтенсифікації роботи існуючих відстійників поширення набуває метод тонкошарового відстоювання, який практично виключає вплив щільнісних і конвекційних потоків і винесення зависі, що коагулюється. На практиці тонкошарові модулі використовуються для підвищення ефективності процесів утворення пластівців та осідання дрібнодисперсних зависей<sup>92</sup>.

Реконструкція діючих відстійників зводиться до зміни їх конструктивного оформлення, внаслідок чого може бути підвищена продуктивність споруд при незмінних якісних показниках проясненої води, або підвищена якість останньої за тієї ж продуктивності. Тому у кожному конкретному випадку задаються певними вихідними показниками. Наприклад, підвищення продуктивності пов'язане зі збільшенням осадової частини споруди, а підвищення якості – зі збільшенням довжини зони відстоювання.

---

<sup>92</sup> Демура М. В. (1963). Горизонтальные отстойники, с. 39.

Передбачуване навантаження на споруду уточнюють після встановлення тонкошарових модулів шляхом визначення фактичної площі та висоти, можливих для встановлення тонкошарових елементів, опорних конструкцій, технологічних трубопроводів. Найбільш характерні схеми реконструйованих споруд наведено на Рисунках 1, 2. При виборі форм елементів та його розрахунку слід, передусім, враховувати можливості виконання монтажних робіт, наявність матеріалів виготовлення тонкошарових модулів.

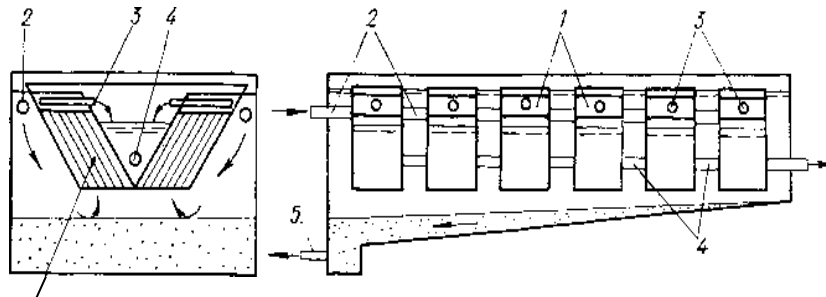


Рис. 1. Встановлення тонкошарових модулів у горизонтальному відстійнику

- 1 – пакети похилих пластин;
- 2 – перфорований впускний колектор;
- 3 – труби для відведення проясненої води;
- 4 – відвідний колектор;
- 5 – мулопровід

Практика експлуатації тонкошарових відстійників показує, що вони дуже чутливі до різких змін навантажень, оскільки об'єм осадової частини в них дуже малий.

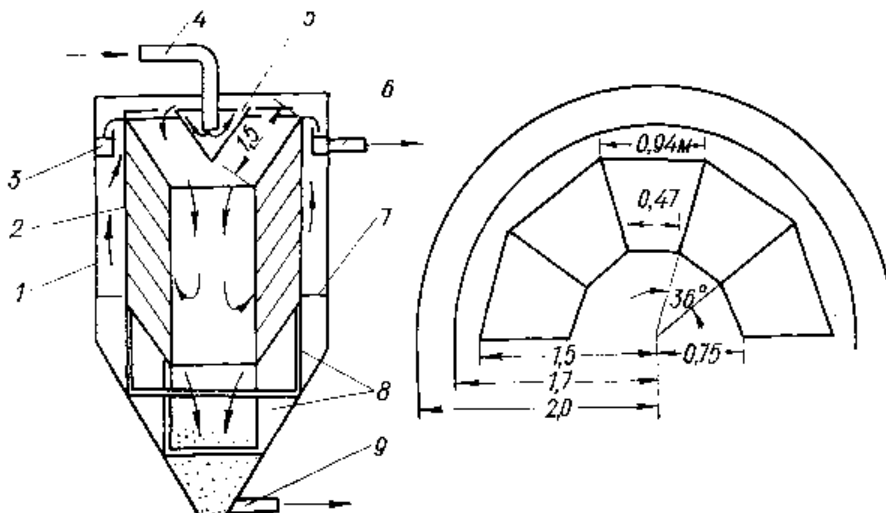


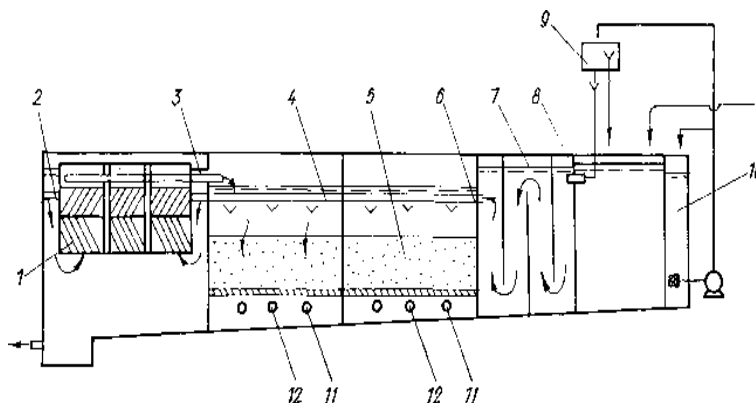
Рис. 2. Встановлення тонкошарових модулів у вертикальному відстійнику

- 1 – ємність;
- 2 – пакети похилих пластин;
- 3 – збірний жолоб;
- 4 – труба, що подає;
- 5 – конус для гасіння енергії струменя;
- 6 – відвідна труба;
- 7 – перегородка;
- 8 – опора;
- 9 – мулопровід

При реконструкції (Рис. 3) існуючих горизонтальних відстійників тонкошаровими блоками за рахунок об'єму, що вивільнився, можна використовувати цей об'єм під регулюючу ємність, а також під ємність для зберігання розчину реагенту, камеру реакції та розміщення фільтрів (робочого та резервного відсіків).

Залежно від галузі застосування тонкошарові модулі виготовляються з листового вініласту (листу ПВХ), гофрованого склопластику та ін. У кожному конкретному випадку розміри, форма і матеріали тонкошарового модуля визначаються розрахунком в залежності від продуктивності, конструктивних параметрів використовуваного обладнання. В даний час

метод тонкошарового відстоювання широко використовується для очищення природних вод. Це пояснюється малими габаритами споруд та створенням у них покращених умов для прояснення води.



*Рис. 3. Схема реконструкції горизонтального відстійника*

1 – пакети похилих пластин; 2 – перфорований колектор; 3 – колектор проясненої води; 4 – жолоби для відведення промивної води; 5 – фільтруюче завантаження; 6 – колектор для подачі води на відстоювання; 7 – камера реакції; 8 – змішувач; 9 – дозатор реагенту; 10 – ємність для зберігання реагенту; 11 – труби для відведення фільтрату; 12 – труби для промивання завантаження

При виборі тонкошарових відстійників слід враховувати конструктивні та технологічні особливості, а саме:

- конструкції тонкошарових блоків;
- режим роботи відстійників;
- нахил блоків та напрямок руху рідини.

За конструктивними особливостями блоків тонкошарові відстійники поділяються на трубчасті та поличкові.

У трубчасті блоки монтуються з окремих труб, що мають прямокутний, квадратний, шестикутний або круглий переріз. Такі відстійники працюють з більш вищими швидкостями порівняно з поличковими, але потребують підвищеної витрати матеріалів.

Поличкові відстійники мають блоки з шириною секції, що значно перевершує висоту. Вони менш матеріаломісткі, ніж трубчасті.

Для виготовлення блоків використовуються поліетиленові та лавсанові плівки, а також полістирол, полівінілхлорид, склопластик, азбестоцемент, алюміній. Полиці виконуються різного профілю: П-подібні (Рис. 4а), хвилеподібні (Рис. 4б), криволінійні (Рис. 4в), V-подібні (Рис. 4г), спіральні та плоскі.

Виконання полиць різних профілів пов'язано з розв'язанням різних задач. Криволінійні полиці дозволяють додатково використовувати відцентрові сили для відокремлення домішок при відстоюванні або компенсувати товщину шару осаду за рахунок поступового зменшення величини перерізу між пластинами. П-подібні, V-подібні та хвилеподібні полиці виключають потрапляння домішок, що виділилися в потік, що прояснюється. Спіральні полиці сприяють переміщенню зависі до периферії корпусу відстійника.

За режимом роботи розрізняють тонкошарові відстійники періодичної та безперервної дії.

Полиці тонкошарових відстійників періодичної дії розташовуються горизонтально або з невеликим нахилом, що дозволяє отримувати найменшу висоту відстоювання за рівних умов з іншими типами відстійників. До недоліків таких відстійників відноситься періодичність роботи, зниження ефекту очищення рідини в кінці циклу внаслідок заповнення осадом міжполочного простору та складність видалення осаду.

Видалення осаду з міжполочного простору таких відстійників здійснюється збільшенням кута нахилу полиць при виключенні його з роботи, промиванням зворотного струму проясненої води, струшуванням і т.д.

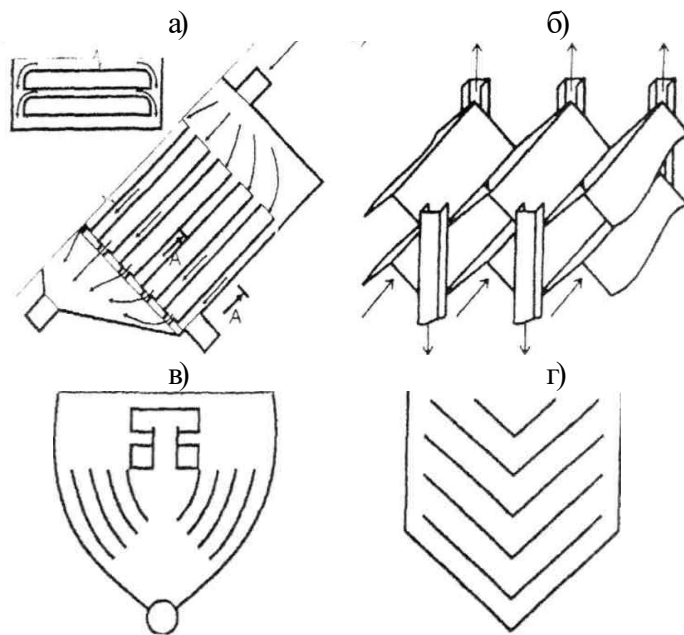


Рис. 4. Форма полиць полицкових тонкошарових відстійників  
 а – П-подібні, б – хвиляподібні, в – криволінійні, г – V-подібні

Відстійники безперервної дії (Рис. 5) характеризуються значним (30-60°) нахилом блоків, що забезпечують постійне сповзання забруднень, що виділилися в зону накопичення осаду.

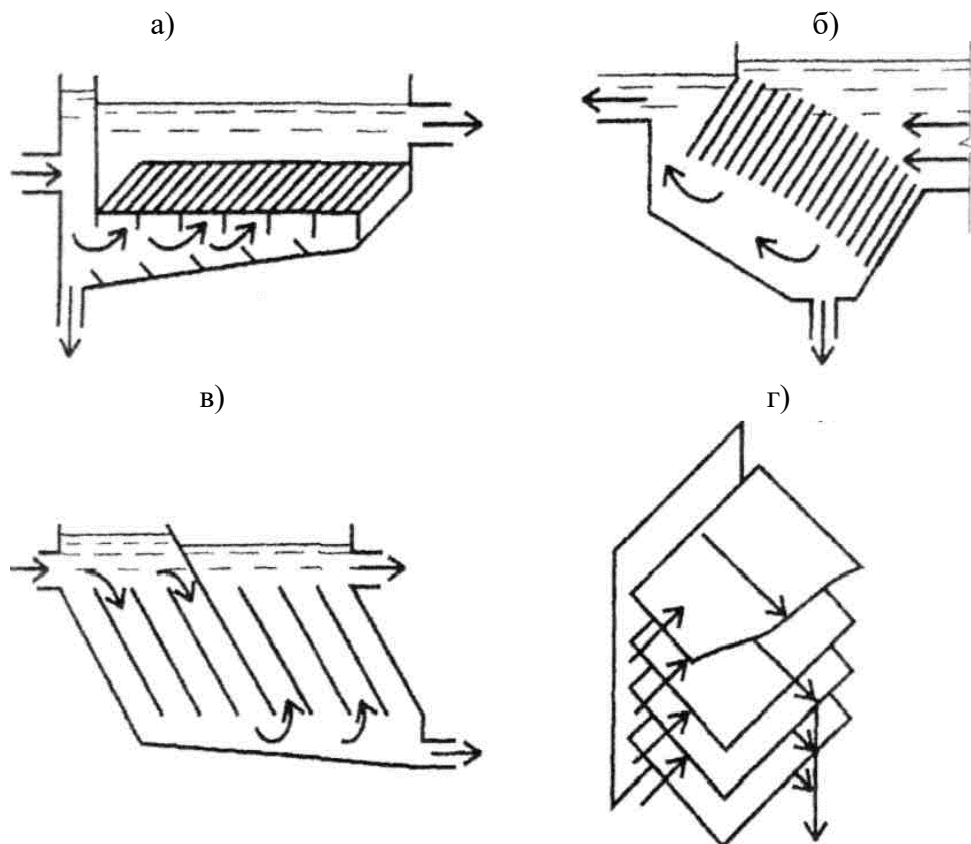


Рис. 5. Полицкові тонкошарові відстійники  
 а – з поздовжнім зворотним нахилом полиць;  
 б – з поздовжнім прямим нахилом полиць;  
 в – з поздовжнім комбінованим набором полиць;  
 г – з поперечним нахилом полиць

По нахилу секцій і напрямку руху рідини, що відстоюється, тонкошарові відстійники підрозділяється на відстійники з поздовжнім прямим, зворотним, комбінованим і поперечним нахилом секцій.

У відстійниках із поздовжнім нахилом блоків вода рухається: зверху вниз – при прямому нахилі, знизу вгору – при зворотному нахилі та поперемінно при комбінованому нахилі.

У відстійниках із поперечним нахилом блоків вода рухається горизонтально, а блоки нахилені у площині, перпендикулярній до напрямку руху води.

Відстійник безперервної дії з поздовжнім зворотним нахилом блоків (Рис. 5а) ефективний при очищенні стічних вод, забруднених осідаючими речовинами. У цьому відстійнику вода, що прояснюється, піднімається вгору, а осад сповзає вниз.

Конструктивні особливості відстійника зі зворотним нахилом хвилеподібних полиць (Рис. 4б) дозволяє одночасно виділяти домішки, що осідають і спливають. Домішки, що спливають, піднімаються вгору під гребенями хвиль у спеціальні канали і відводяться. Такими ж каналами відводяться осідаючі домішки, що сповзають вниз по западинам хвиль.

Тонкошаровий відстійник безперервної дії з прямим поздовжнім нахилом секцій (Рис. 5б) призначений для очищення вод, забруднених переважно домішками, що спливають, і порівняно невеликою кількістю важких частинок, що осідають. Відстійник, що працює за такою ж схемою, але має канали П-подібної форми (Рис. 4а), призначений для виділення тільки частинок, що осідають.

Відстійники з поздовжнім комбінованим нахилом полиць придатні для виділення як спливаючих домішок, так і домішок, що осідають.

На Рис. 5а і 5б представлені відстійники, в яких поліпшення розподілу рідини за об'ємом тонкошарових блоків досягається збільшенням висоти кожної наступної вертикальної перегородки та розташуванням верхніх кромek полиць по криволінійній поверхні. Інші розподільні пристрої виконуються у вигляді дірчастого відбивача на вході та решіток на виході та вході з живим перерізом, що збільшується до периферії, заспокійливої камери з сіткою та жалюзями, дірчастої діафрагми на вході, що забезпечує підвищений гідравлічний опір. Рівномірність розподілу забрудненої рідини по осередках здійснюється за рахунок установки блоків з утворенням клиноподібних розподільних щілин торцями боків.

Тонкошаровий відстійник, представлений на Рисунку 5в, дозволяє великі механічні домішки виділяти з рідини при її русі вниз, а спливаючі та дрібнодисперсні домішки – при русі вгору. Домішки, що осідають, по полицях транспортуються вниз у зону накопичення осаду, спливаючі – по нижній площині вищерозташованої полиці вгору і відводиться з верхньої частини зливної камери. Прояснена рідина відводиться із нижньої частини зливної камери.

Тонкошарові відстійники з поперечним нахилом полиць (Рис. 5г) застосовуються для очищення стічних вод, що містять домішки, які спливають і осідають.

Трубчастий тонкошаровий відстійник з комбінованим нахилом блоків (Рис. 5в), призначений для виділення домішок, що осідають. Тонкошаровий блок цього відстійника складається з труб круглого перерізу із зазорами, тобто з міжтрубними просторами певних розмірів.

Вода, що прояснюється, подається через верхню частину і рухається міжтрубним простором, в нижній частині вона через отвори надходить у труби, піднімається по них вгору і відводиться. Осідання завислих частинок відбувається в два етапи: при русі води, що прояснюється, вниз осідають найбільш великі, а при русі вгору – більш дрібні частинки зависі. За рахунок нахилу трубчастих секцій та dna відстійника осад переміщається до зони його накопичення.

Трубчастий відстійник дозволяє виділяти з рідини, що очищується, домішки, які осідають і спливають.

Велике значення при конструюванні тонкошарових відстійників приділяється рівномірному розподілу рідини, що прояснюється, по ярусах, що дозволяє підвищити

продуктивність споруди та ефективність очищення вод. Існують різні конструкції розподільних пристроїв.

Тонкошарові відстійники у системах питного водопостачання використовуються як самостійні споруди, так і спільно з іншими. Вони застосовуються в якості першого або другого ступенів залежно від розв'язуваних завдань.

Слід зазначити, що в період низьких температур і недостатньої лужності води, що прояснюється, процеси накопичення і видалення осаду в тонкошарових відстійниках сповільнюються. Тому для інтенсифікації процесів накопичення, ущільнення та сповзання осаду у відстійну зону застосовують реагентні і фізичні методи, у тому числі, вібраційні акустичні методи, які не завжди можуть бути використані з технічних та економічних причин.

*Санітарно-екологічні вимоги до якості питної води.* Специфіка питного водопостачання в Україні полягає в тому, що воно на 75% базується на поверхневих джерелах і залежить від їх екологічної безпеки. Зростання ризику та зниження безпеки систем водопостачання пояснюється, по-перше, значним зменшенням запасів води; а по-друге – різким погіршенням якості природних вод.

Стан річкової води в Україні оцінюється за гідрохімічними показниками від слабо до сильно забрудненого. З поверхневих джерел за бактеріальним забрудненням тільки 2% знаходяться в задовільному стані, а 65% – не придатні для водокористування. Найбільша забрудненість спостерігається у басейнах річок Дніпро, Сіверський Донець, Дністер та Південний Буг.

До основних заходів, що поліпшують екологічний стан поверхневих джерел водопостачання можна віднести наступні:

- очищення води, яка утворюється поверхневим стоком з призначених для забудови територій, будівництво систем водовідведення в містах і сільських населених пунктах;
- поліпшення стану зон санітарної охорони;
- благоустрій водоохоронних та прибережних захисних смуг водних об'єктів;
- захист питних водозаборів від шкідливого впливу тваринницьких, птаховничих підприємств та інших сільськогосподарських об'єктів, які є потенційним джерелом забруднення води;
- розчищення русел і зміцнення берегів річок і дна водосховищ;
- державний моніторинг стану водних об'єктів, які використовуються в якості джерела водопостачання.

Якість води визначається наявністю в ній різних речовин неорганічного та органічного походження, а також мікроорганізмів<sup>93</sup>.

Домішки можуть міститися у воді у різному стані: а) у завислому – у вигляді окремих частинок (грубодисперсна завись); б) колоїдному; в) у розчиненому.

Екологічні та гігієнічні вимоги до якості питної води регламентуються ДСанПіНом України який визначає придатність води для питних цілей, а саме:

- безпеки та якості питної води;
- за показниками фізіологічної повноцінності мінерального складу питної води;
- радіаційна безпека;
- безпека в епідеміологічному відношенні.

Як додатковий інтегральний (експресний) показник якості води – при підозрі забруднення вододжерел (у місці водозабору, вище за течією річки, в регіоні) або водозабезпечуючої мережі, водопровідної води невідомими токсичними сполуками, хімічними речовинами, для визначення яких немає доступних та чутливих методів, – рекомендується індекс токсичності води, який розраховують за результатами біологічних тестів (біотестування):

---

<sup>93</sup> Эпоян С. М., Благодарная Г. И., Душкин С. С. (2013). Повышение эффективности работы сооружений при очистке питьевой воды, с. 8.

$$T = \frac{l_k - l_o}{l_k} \cdot 100\% , \quad (1)$$

де  $T$  – індекс токсичності проби досліджуваної води;

$l_k$  – величина тест-реакції в контрольній пробі;

$l_o$  – величина тест-реакції в досліджуваній пробі.

Індекс токсичності води, яка не містить неідентифікованих компонентів, не повинен перевищувати 50% незалежно від використаних тест-об'єктів, якими можуть бути дафнії, інфузорії та ін.

При проведенні знезараження води концентрація залишкових частин дезінфектантів, які визначаються не рідше ніж 1 раз на годину, мають становити:

- при знезараженні питної води хлором вміст залишкового хлору на виході з резервуарів чистої води має бути 0,3-0,5 мг/дм<sup>3</sup> (якщо тривалість контакту хлору з водою не менше 30 хв), а вміст пов'язаного залишкового хлору – 0,8-1,2 мг/дм<sup>3</sup> (якщо тривалість контакту хлору із водою щонайменше 60 хв). При спільній наявності у воді вільного та зв'язаного хлору дозволяється проводити контроль за одним з них: по залишковому вільному хлору (при його концентрації понад 0,3 мг/дм<sup>3</sup>) або по залишковому зв'язаному хлору (при концентрації вільного залишкового хлору менше 0,3 мг/дм<sup>3</sup>);

- при знезараженні води озоном концентрація залишкового озону на виході з камери змішування має бути 0,1-0,3 мг/дм<sup>3</sup> при тривалості контакту не менше ніж 4 хв.

Взаємозв'язок дози дезінфектанту ( $C$ , мг/дм<sup>3</sup>) і часу ( $T$ , хв), необхідного і достатнього для забезпечення епідеміологічної безпеки води, що обробляється під час її проходження до першого споживача, визначає критерій « $C \times T$ », який може бути встановлений експериментально для кожної конкретної води з урахуванням показників її хлоропоглинання. Встановлено, що у 99,99% випадків інактивація води за ентеровірусами гарантує епідеміологічну безпеку питної води і за мікробіологічними, і за паразитологічними показниками.

Орієнтовні значення критерію « $C \times T$ » наведені в Таблицях 1 та 2.

Таблиця 1. Критерій « $C \times T$ » для інактивації хлором поверхневих вод на 99,99% за ентеровірусами при 5°C (чисельник) та 10°C (знаменник)

Залишковий активний хлор, мг/дм <sup>3</sup>	рН				
	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
0,4	92/70	114/90	140/105	170/130	200/150
0,6	100/75	124/95	150/115	180/140	220/165
0,8	105/80	130/100	160/120	190/145	230/170
1,0	110/85	135/105	170/125	200/150	240/180

Порушення санітарно-гігієнічних та санітарно-протиепідеміологічних правил і норм, а також невиконання випущених на їх підставі приписів органів санітарно-епідеміологічного нагляду тягне за собою відповідальність відповідно до Закону України «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення».

Таблиця 2. Критерій « $C \times T$ » для інактивації різними дезінфектантами поверхневих вод (після фільтрації) на 99,99% за ентеровірусами

Дезінфектанти, мг/дм <sup>3</sup>	рН	Температура, °C				
		0,5	5	10	15	20
Хлор (газ), при залишковому активному хлорі 2 мг/дм <sup>3</sup>	6	60	40	30	20	5
	7	90	60	40	30	20
	8	130	90	60	50	30
	9	170	120	90	60	45
Діоксид хлору	6-9	27	18	13	9	7
Хлорамін	6-9	1100	770	570	370	220
Озон, 0,3 мг/дм <sup>3</sup>	6-9	1,5	1	0,8	0,7	0,5



Експериментальні дані, аналіз їх.

Матеріали та методи дослідження використання модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію при підготовці питної води в горизонтальних відстійниках. Дослідження з інтенсифікації роботи горизонтальних відстійників з використанням модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію при підготовці питної води виконували в лабораторних умовах. Також серія досліджень була проведена на пілотній установці, що розташована на очисних спорудах водопроводу<sup>94</sup>.

Дослідження закономірностей процесів осідання зависі у відстійниках при обробці води модифікованим розчином коагулянту проводились на моделі горизонтального відстійника у зимовий та весняний періоди. Під час проведення досліджень було прийнято 5-10%-ний розчин сульфату алюмінію.

Тривалість кожного експерименту становила щонайменше 24 години. Якісна характеристика вихідної води наведена у Таблиці 3.

Таблиця 3. Якісна характеристика води дослідженого джерела водопостачання

Період досліджень	Температура°С	Каламутністьмг/дм <sup>3</sup>	Забарвленість град	pH	Загальна твердість моль/дм <sup>3</sup>	Лужність моль/дм <sup>3</sup>
<i>Зимовий</i>						
Січень	0,8-1,5	10,5-12,1	42-45	7,8-8,1	3,55-3,75	2,4-2,9
Лютий	0,8-1,5	10,5-15,6	42-45	7,8-8,1	3,85-4,06	2,8-3,2
<i>Весняний</i>						
Березень	3,6-4,2	12,1-15,5	42-45	7,9-8,2	4,05-4,35	3,15-3,55
Квітень	5,6-11,6	12,3-18,6	42-45	7,9-8,3	4,05-4,35	3,35-3,7
<i>Модельна вода</i>						
	1,5-21,3	25,0-750,0	20-75	7,1-7,7	3,35-3,65	2,55-2,9

Під час проведення експериментів вода була штучно замутна дрібнодисперсними частинками каоліну.

Коефіцієнт підвищення ефективності очищення води (К) визначали за відношенням:

$$K = \frac{D_0}{D_m}, \quad (2)$$

де  $D_0$  – залишковий вміст завислих речовин в проясненій воді (оптична щільність зависі в пробі) при обробці звичайним розчином реагенту, мг/дм<sup>3</sup>;

$D_m$  – залишковий вміст завислих речовин в проясненій воді (оптична щільність зависі в пробі) при обробці води модифікованим розчином коагулянту, мг/дм<sup>3</sup>.

Ефект впливу модифікованого розчину коагулянту на гідравлічну крупність коагульованої зависі, яка осідає зі швидкістю 1,2 мм/с та 0,2 мм/с і більше, визначали за відношенням:

$$E = \frac{E_M}{E_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де  $E$  – ефективність впливу модифікованого розчину коагулянту, %;

$E_M$  – процент зависі, яка випала у воді, що оброблена модифікованим розчином коагулянту, %;

$E_0$  – процент зависі, яка випала у воді при звичайній коагуляції, %.

Для модифікування розчину коагулянту використовувався модифікатор, схема якого наведена на Рисунку 6<sup>95</sup>.

<sup>94</sup> Володченко О. В. (2002). Анализ методов интенсификации работы очистных сооружений. Техника, 39, с. 270.

<sup>95</sup> Пат. 4552. (2005). Пристрій для активації розчинів реагентів.

Модифікатор містить корпус 1 магнітопроводу, вироблений з магнітом'якої стали. Корпус розділений на дві частини струмонепровідними ферритомагнітними прокладками 2, в середині знаходиться циліндр 3 з ізоляційного немагнітного матеріалу, на якому укріплена котушка, що намагнічує 4 електромагнітної системи, електроди 5, встановлені по колу на нижньому і верхньому магнітопроводі зі змінною полярністю. Оптимальна кількість електродів та їх конструктивні розміри залежать від продуктивності пристрою, необхідної концентрації насиченого розчину, який визначається відповідними розрахунками.

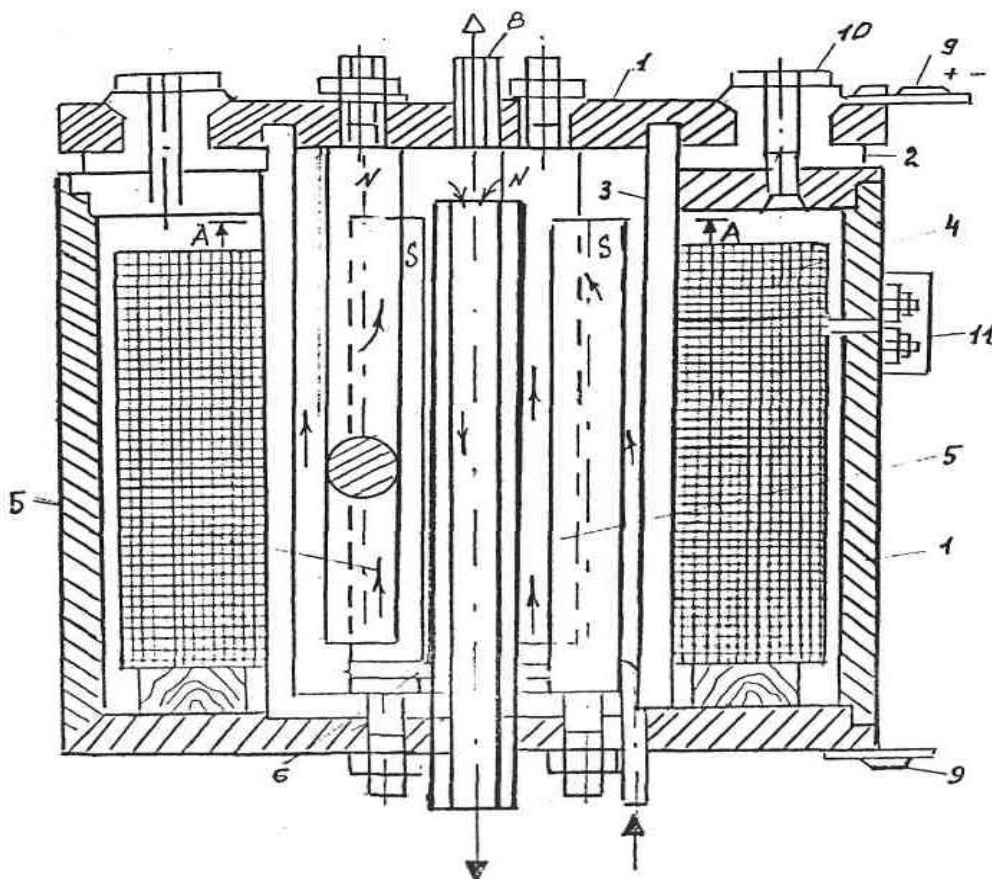


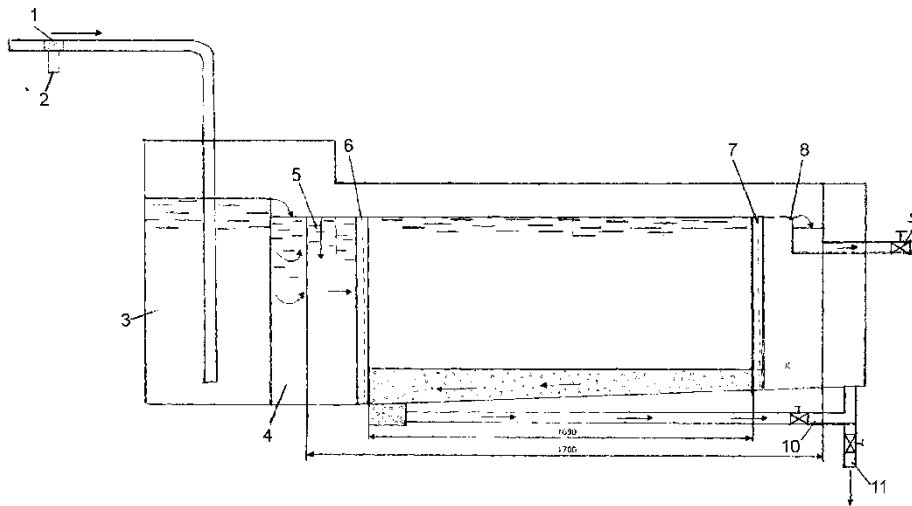
Рис. 6. Конструктивна схема модифікатора реагентів

Пристрій забезпечений розподільною системою 6 рівномірної подачі рідини відповідно патрубкам 7, які облаштовані таким чином, що між корпусом та іншими електродами залишається повітряний простір для збору водню, випуск його відбувається по трубі 8 за межі приміщення через діелектричний шланг. До нижньої і верхньої секції магнітопроводу приєднується клемма 9 для подачі постійного струму на електроди. Кріплення електропроводу проводиться болтами 10 з діелектричними прокладками. На корпусі магнітопроводу встановлена клемна коробка 11 котушки, що намагнічує, яка служить для з'єднання проводів від випрямляча постійного струму.

Пристрій працює таким чином: розчин, оброблюється, надходить на пристрій через розподільну систему 6 рівномірної подачі рідини, проходить між електродами 5, де піддається впливу магнітного поля, яке створюється електромагнітною котушкою 4 і постійним струмом, який проходить між електродами. Внаслідок електролізу і наявності магнітного поля, оброблений розчин інтенсивно насичується гідроксидом заліза, і при цьому утворюються збільшені флоккули, які здійснюють головну роль в процесі флокуляції забруднень рідини, що очищається. Відпрацьована рідина відводиться по патрубку 7. При електролізі утворений водень відводиться патрубком 8.

Експерименти виконували на воді, обробленою модифікованим розчином коагулянту сульфату алюмінію та для умов звичайної коагуляції.

Схема моделі горизонтального відстійника наведена на Рисунку 7.



*Рис. 7. Схема моделі горизонтального відстійника*

*1 – подача вихідної води; 2 – витратомір; 3 – камера реакції;  
4 – заспокійливий бак;*

*5 – приймальний лоток з дірчастим дном;*

*6, 7 – розподільні дірчасті перегородки;*

*8 – кінцевий добірний жолоб; 9 – відведення проясненої води;*

*10 – система гідралічного скидання осаду; 11 – відведення в каналізацію*

Відстійник виготовлений із оргскла товщиною 10 мм. Підведення води здійснювали відцентровим насосом. На вході передбачені вбудована камера реакції з часом перебування в ній 2 хв, потім заспокійливий бак і приймальний дірчастий лоток. Розподільні дірчасті стінки поставлені на початку та наприкінці моделі. Відбір води здійснювали кінцевим добірним жолобом. Ухил дна моделі відстійника становив 0,002. Осад видаляли системою гідралічного скидання осаду  $d^{1/4}$ " через три клапани  $d^{1/2}$ ", розташовані на трубі  $d^{1/2}$ ". Прояснену воду та осад скидали по трубі  $d = 100$  мм в канал стічних вод і далі в ставок прояснювач заводу. Навантаження на модель становило  $0,39$   $\text{дм}^3/\text{с}$  та залежно від мети експерименту збільшувалася до  $0,59$   $\text{дм}^3/\text{с}$ , що відповідало навантаженню в 1,5 рази. Кількість води при скиданні осаду дорівнювала 1,5-2,0% від загальної кількості води, що подається на модель відстійника. Кількість води, що подається на модель, контролювали крильчастим витратоміром 32 калібру, швидкість руху води – вертушка Ж-3 і ВЖН-3, у ряді випадків використовували барвник флуоресцеїн, приготовлений у вигляді 10% розчину. Межі осаду визначали візуально з підсвічуванням на протилежному боці відстійника зі спеціально нанесеною на оргскло сіткою з осередками 1 мм. Концентрацію завислих речовин залежно від експерименту знаходили ваговим та фотоелектричним способом за допомогою ФЕК-54, стабілізацію колоїдних домішок здійснювали за спеціально розробленим методом. Відсоткові швидкості осідання зависі та фізико-хімічні показники встановлювали за загальноприйнятими методиками. Ефективність роботи відстійника визначали за ступенем прояснення води з використанням «хреста» з періодичною перевіркою каламутності води ФЕКМ-54.

*Обробка експериментальних даних.* Обробка експериментальних даних виконувалася з допомогою ПЕОМ. Увага була приділена оцінці надійності результатів, їх відтворюваності та визначенню довірчого інтервалу виконаних досліджень. Основні положення методики обробки експериментальних даних наведено нижче<sup>96</sup>.

*Оцінка надійності результатів експериментів та їх відтворюваність.* Результати експериментів обробляли згідно з рекомендаціями Міжнародного Союзу чистої та прикладної хімії (ІНПАК) за методами визначення та формою позначення помилок та

<sup>96</sup> Душкин С. С. (2012). Методологические аспекты проведения исследований при использовании активированных растворов коагулянта в процессе очистки воды, с. 332.

відхилень, які одержують при масових аналітичних дослідженнях. При цьому використовували такі формули:

Середнє арифметичне

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4)$$

де  $n$  – загальна кількість повторних визначень;

$x$  – результати окремого визначення;

$i$  – поточний номер повторного відділення.

Дисперсія окремого результату

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad (5)$$

де  $n-1$  – число ступенів свободи кожного визначення.

Стандартне відхилення окремого результату

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (6)$$

Стандартне відхилення середнього результату (середня квадратична помилка середнього арифметичного)

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (7)$$

Точність визначення середнього результату

$$E_\alpha = t_\gamma \cdot S_{\bar{x}}, \quad (8)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт надійності;  $t_\gamma$  – коефіцієнт Стьюдента<sup>97</sup>.

Відносна похибка середнього результату

$$\frac{E_\gamma}{\bar{x}} \cdot 100. \quad (9)$$

Відтворюваність дослідів перевіряли за критерієм Кохрена.

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N (S_i^2)} \leq G(0,05; f_N; fx), \quad (10)$$

<sup>97</sup> Булгакова О. В. (2010) Изменение структурно-механической гидратации гидроксида алюминия при обработке воды активированным раствором коагулянта, с. 145-146.

де  $N$  – кількість повторних дослідів;

$S_{max}^2$  – найбільша дисперсія дослідів;

$G(0,05; f_N; fx)$  – табличне значення критерію Кохрена при 5%-вому рівні значущості:

$f_N = N$  – кількість незалежних оцінок;  $fx = n - 1$  – число ступенів свободи кожної оцінки.

Процес вважається відтворюваним, якщо виконується нерівність (10) і будь-яке значення Кохрена, отримане розрахунковим шляхом за даними експериментів, менше його табличного значення.

При цьому дисперсія відтворюваності (помилка дослідів) визначається за формулою

$$S_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_X^2}{N} \quad (11)$$

Відтворюваність дослідних даних у межах достовірного інтервалу

$$\bar{x} - t_\gamma \cdot \frac{S_x}{\sqrt{n}} < a < \bar{x} + t_\gamma + t_\gamma \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (12)$$

де  $a$  – достовірний інтервал;

$\bar{x}$  – середнє арифметичне дослідних даних (формула 4);

$t_\gamma$  – коефіцієнт Стюдента;

$S_x$  – середня квадратична помилка середнього арифметичного досвідчених даних (формула 7).

Перевірка відтворюваності дослідів показала, що процес відтворюємий, оскільки будь-яке значення критерію Кохрена, отримане розрахунковим шляхом, менше його табличного значення, що дорівнює 0,8709.

*Довірчий інтервал при оцінці результатів досліджень, обґрунтування його.* При обробці дослідних даних середньоарифметичне відхилення має бути в межах довірчого інтервалу.

При цьому якщо для оцінки невідомого параметра  $\theta$  визначаються два значення  $A$  і  $B$  таким чином, що є ймовірність  $1 - \alpha$  здійснення нерівності  $A < \theta < B$ , то  $A$  і  $B$  являються  $100(1 - \alpha)\%$  довірчими інтервалами (межами), а інтервал між ними є  $100(1 - \alpha)\%$  довірчим інтервалом. Так як ймовірність того, що цей інтервал не включає в себе  $\theta$ , дорівнює  $\alpha$ , то при зворотному затвердженні помилка складає  $100\alpha\%$ .

Нехай проводиться  $n$  незалежних рівноточних вимірів деякої величини, справжнє значення якої  $a$  невідоме. Результати окремих вимірів – випадкові величини, які мають одне й те саме математичне очікування  $a$ , однакові дисперсії та розподілені нормально. Потрібно оцінити невідоме математичне очікування  $a$  за допомогою довірчого інтервалу.

Розрахунок проводиться за допомогою розподілу Стюдента.

$$\text{Величина} \quad t = \frac{\bar{x} - a}{S_{\bar{x}}} \sqrt{n} \quad (13)$$

є нормоване відхилення нормально розподіленої випадкової величини  $\bar{x}$  від центру групування. Якщо ми маємо

$$P(|t| > t_\alpha) = \alpha, \quad (14)$$

то

$$P(-t_\alpha < t < t_\alpha) = P(-t_\alpha < \frac{\bar{x} - a}{S\bar{x}} \sqrt{n} < t_\alpha) = 1 - \alpha = \gamma, \quad (15)$$

за будь-якого значення  $\bar{x}$ ,

де  $t_\alpha$  – коефіцієнт Стьюдента;

$S\bar{x}$  – стандартне відхилення середнього результату (7);

$\gamma$  – надійність обчислення (довірча ймовірність).

Далі, нерівність

$$\frac{\bar{x} - a}{S\bar{x}} \sqrt{n} < t_\alpha, \quad (16)$$

рівносильно нерівності

$$\bar{x} - \frac{t_\alpha S\bar{x}}{\sqrt{n}} < a, \quad (17)$$

оскільки нерівність (16) рівнозначна нерівності

$$\bar{x} - a < \frac{t_\alpha S\bar{x}}{\sqrt{n}}, \quad (18)$$

і тому що  $S\bar{x} \geq 0$ .

Аналогічно знайдемо рівносильними

$$-t_\alpha < \frac{\bar{x} - a}{S\bar{x}} \sqrt{n}, \quad (19)$$

$$a < \bar{x} + \frac{t_\alpha S\bar{x}}{\sqrt{n}}. \quad (20)$$

Отже, твердження, що  $\frac{\bar{x} - a}{S\bar{x}} \sqrt{n}$  потрапляє між  $-t_\alpha$  і  $t_\alpha$  рівносильно твердженню, що

$$\bar{x} - \frac{t_\alpha S\bar{x}}{\sqrt{n}} < a \quad \text{и} \quad \bar{x} + \frac{t_\alpha S\bar{x}}{\sqrt{n}} > a.$$

Тоді

$$P\left(\bar{x} - t_\alpha \frac{S\bar{x}}{\sqrt{n}} < a < \bar{x} + t_\alpha \frac{S\bar{x}}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha = \gamma, \quad (21)$$

тобто інтервал між  $\bar{x} - \frac{t_\alpha S\bar{x}}{\sqrt{n}} < a$  и  $\bar{x} + \frac{t_\alpha S\bar{x}}{\sqrt{n}} > a$  є  $100 \cdot (1 - \alpha)\%$ -вий (або  $100\gamma\%$ -вий) довірчий інтервал для невідомого середнього  $\bar{x}$ .

Довірчі інтервали можуть бути застосовані до будь-якої нормально розподіленої змінної з відомою змінною з відомим стандартним відхиленням.

Надійність обчислення (довірча ймовірність) задається самим експериментатором. Приймаємо  $\gamma = 0,95$ .

Отримана таким чином (21) величина довірчого інтервалу може бути досить великою. Є можливість (щонайменше теоретична) зменшення довжини довірчого інтервалу. Для цього знадобиться ще одна вибірка більшого розміру дослідних даних.

*Дослідження застосування модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію при підготовці питної води в горизонтальних відстійниках з тонкошаровими модулями.* Наявність у воді механічних домішок дуже впливає на фізичні параметри коагульованої зависі. У міру збільшення вмісту домішок зростають щільність, міцність на стиск і швидкість осідання частинок, а кількість води, що міститься в осередках структури зависі, різко зменшується<sup>98</sup>.

Безпосередній вплив на фізико-хімічні процеси очищення води надають об'ємна концентрація, розмір та сила зчеплення зависі контактного середовища. Перші два параметри визначають площу твердої поверхні, з якою контактує вода, що оброблюється і пов'язані явища каталізу, сорбції та адгезії. Крім того, від об'ємної концентрації залежить інтенсивність явищ циркуляції та дифузії зависі, що впливають на фізико-хімічні процеси очищення води та зумовлюють динамічну рівновагу контактного середовища та процес видалення з нього надмірної зависі.

Гідравлічна характеристика зависі визначає швидкість осідання та ступінь однорідності зависі. Від неї залежить швидкість руху води у відстійнику і, отже, його пропускна здатність.

За результатами визначення фізичних параметрів контактного середовища можна встановити причини незадовільного ефекту очищення води та підібрати оптимальний режим експлуатації горизонтального відстійника, який залежить від таких факторів як: ступеня структурно-механічної гідратації коагулюваних домішок, питомої ваги та зчеплення їх з контактним середовищем, а також  $\xi$ -потенціалу та адсорбційної ємності гідроксиду алюмінію в процесі очищення води<sup>99</sup>.

*Зміна ступеня структурно-механічної гідратації гідроксиду алюмінію при обробці води модифікованим розчином коагулянту в горизонтальних відстійниках.* Істотним недоліком коагулянту сульфату алюмінію є висока чутливість його до температури води, яка прояснюється, що пояснюється великою гідратацією алюмінію, що утворюється при гідролізі гідроксиду при низьких температурах (1-2°C). Зростанню гідратації при цих умовах сприяє стабілізація золю гідроксиду алюмінію, який погано коагулюється в даному випадку с іонами  $\text{HCO}_3^-$  і  $\text{SO}_4^{2-}$  навіть в концентраціях, які в кілька разів перевищують їх звичайний вміст у воді. Підвищення стійкості золю сильно впливає на швидкість утворення пластівців.

Цим пояснюється те, що при використанні сульфату алюмінію в умовах низьких температур спостерігається уповільнення процесу утворення пластівців, потрапляння залишкового алюмінію в очищену воду.

Водонасиченість продуктів гідролізу коагулянтів залежить від їх складу та структури. Завдяки великому заряду і відносно малому радіусу, катіон  $\text{Al}^{3+}$  сильно гідратований. Приєднані до катіонів  $\text{Al}^{3+}$  гідроксильні групи також зв'язують велику кількість води. Особливо велику кількість води гідроксид алюмінію включає в початковий момент структуроутворення, коли на додаток до хімічної гідратації відбувається механічне захоплення води. У цей момент кількість води в осередках у сотні разів перевищує вміст твердої фази.

За даними Є. Ф. Кургаєва відношення об'єму води, що включена в осередок, до об'єму твердої речовини в неущільнених опадах  $\text{Al}(\text{OH})_3$  складає 12:10. Зменшення гідратації гідроксиду алюмінію дозволяє збільшити вміст твердої фази пластівців, що утворюються, і прискорити їх осідання.

Зменшення гідратації контактного середовища дозволяє прискорити процес очищення води, підвищити питому вагу пластівців, що утворюються, величина якого робить значний вплив на концентрацію завислого осаду, його осідання та ущільнюваність.

<sup>98</sup> Найманов А. Я., Никиша С. Б., Насонкина Н.Г. и др. (2006). Водоснабжение, с. 343.

<sup>99</sup> Душкин С. С. (1988). Улучшение технологии очистки природных и сточных вод магнитным полем, с. 25.

Зі збільшенням питомої ваги пластівців, за інших рівних умов, завись стає концентрованішою, осаджуваність і ущільнюваність її збільшуються. При одній і тій же швидкості руху потоку води концентрація осаду значною мірою залежатиме від питомої ваги пластівців, з яких він складається, або, що буде більш точним, від різниці питомих ваг цих пластівців і середовища, в якому вони завислі. Чим більша ця різниця, тим концентрованіший шар осаду.

Безпосереднє вимірювання гідратації осаду коагульованої зависі у відстійниках становить значні труднощі, тому що при цьому відбувається нейтралізація та перерозподіл заряду по навколишніх молекулах води. Тому при виконанні досліджень, пов'язаних з вивченням впливу модифікованого розчину сульфату алюмінію на ступінь дегідратації контактного середовища як основний критерій приймається ступінь структурно-механічної гідратації, яка враховує поряд з хімічною гідратацією і механічне захоплення води.

Контактним середовищем в горизонтальному відстійнику є завислий шар частинок, що складається з продуктів процесів обробки, в основному гідролізу коагулянту, тому, температура води, що прояснюється, безпосередньо впливає на ефективність роботи відстійника. При цьому можна говорити не тільки про гідратацію гідроксиду алюмінію, але і про гідратацію контактного середовища зависі горизонтального відстійника.

Модифікації піддавався 10%-вий розчин коагулянту сульфату алюмінію, яким оброблялася вода в циліндрах з конічним днищем, рекомендованих правилами технологічного аналізу води. Визначався ступінь структурно-механічної гідратації осаду, що осів з гідравлічною крупністю 0,2 мм/с і більше щодо:

$$\Gamma_0 = \frac{\gamma_T - \gamma_0}{\gamma_0} \approx \frac{\gamma_T}{\gamma_0}, \quad (22)$$

де  $\gamma_T$  – питома вага твердої речовини, що утворює каркас пластівців осаду, г/мл;  
 $\gamma_0$  – ваговий вміст твердої фази в одиниці об'єму осаду, г/мл;

$$\gamma_0 = \frac{G}{hf}, \quad (23)$$

де  $G$  – вагова кількість твердої фази в осаді, г;  
 $h$  – висота шару осаду, см;  
 $f$  – площа перерізу циліндра, см<sup>2</sup> (8,2 см<sup>2</sup>).

Вплив модифікованого розчину сульфату алюмінію на рівень структурно-механічної гідратації осадів, що утворюються в процесі очищення води, наведено на Рис. 8.

Дослідні дані показують, що структурно-механічна гідратація осадів залежить як від напруженості магнітного поля, так і від вмісту в розчині коагулянту анодно-розчиненого заліза. При приблизно однакових напруженнях магнітного поля ступінь структурно-механічної гідратації гідроксиду алюмінію зменшується з підвищенням розчину коагулянту анодно-розчиненого заліза. При вмісті анодно-розчиненого заліза понад 630 мг/дм<sup>3</sup> рівень структурно-механічної гідратації практично не змінюється. При модифікації розчину коагулянту спостерігається незначна зміна структурно-механічної гідратації осаду. При модифікації розчину коагулянту збільшується питома вага твердої речовини, що утворює каркас пластівців осаду, що видно з даних Таблиці 4.

У горизонтальних відстійниках зменшення ступеня гідратації контактного середовища дозволяє прискорити процес утворення пластівців, підвищити питому вагу пластівців, що утворюються, величина якого значно впливає на концентрацію завислого осаду, його осідання та ущільненість.



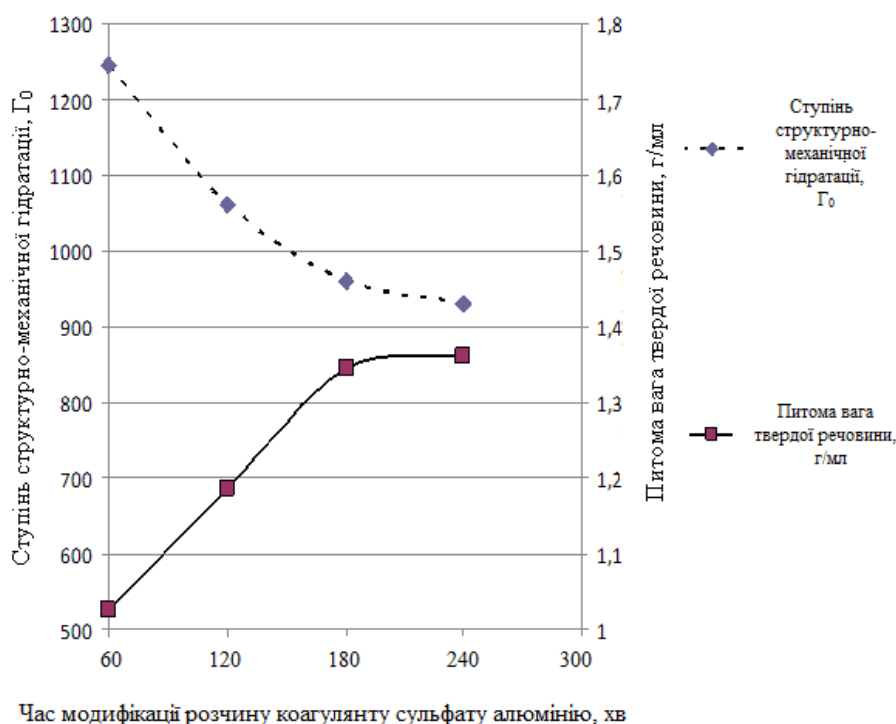


Рис. 8. Зміна частки твердої речовини та ступеня структурно-механічної гідратації контактного середовища горизонтального відстійника при модифікації розчину сульфату алюмінію

Зміна ступеня структурно-механічної гідратації і питомої ваги твердої речовини контактного середовища горизонтальних відстійників при модифікації розчину коагулянту наведена в Таблиці 4.

Таблиця 4. Зміна ступеня структурно-механічної гідратації і питомої ваги твердої речовини контактного середовища горизонтальних відстійників при модифікації розчину коагулянту

Ступінь структурно-механічної гідратації		Зміна ступеня структурно-механічної гідратації, %	Величина довірчого інтервалу $\alpha$ ( $\gamma = 0,95, n=4$ )	Питома вага твердої речовини, г/мл		Зміна питомої ваги твердої речовини, %	Величина довірчого інтервалу $\alpha$ ( $\gamma=0,95, n=4$ )
при звичайному відстоюванні	при використанні модифікованого розчину коагулянту			Середнє значення	Результати окремих визначень		
1251	1242 1244 1246 1248	-	1243,5< $\alpha$ >1248,3	1,025	1,022 1,024 1,026 1,028	-	1,019< $\alpha$ >1,026
1061	1060 1061 1063 1064	14,7	1059,4< $\alpha$ >1064,4	1,186	1,183 1,185 1,187 1,189	15,70	1177< $\alpha$ >1189
958	959 958 961 962	22,7	958,3< $\alpha$ >963,4	1,345	1,341 1,343 1,347 1,349	31,22	1,341< $\alpha$ >1,348
920	926 929 932 933	25,3	927,2< $\alpha$ >934,4	1,362	1,359 1,360 1,364 1,365	32,88	1,358< $\alpha$ >1,366

Зі збільшенням частки пластівців, при застосуванні модифікованого розчину коагулянту, з'являється можливість підвищення швидкості осідання коагульованих домішок, збільшення їх ущільнюваності, що дозволить зрештою інтенсифікувати процес очищення води.

Зміна  $\zeta$ -потенціалу коагульованих домішок та адсорбційної ємності гідроксиду алюмінію. Агрегативна стійкість колоїдних та інших коагульованих домішок характеризується не тільки наявністю електростатичних сил відштовхування, а й іншими чинниками, основним з яких є гідратація частинок, тобто. утворення на їх поверхні оболонки із молекул дисперсійного середовища. У коагульованих домішках природної води при досягненні порогових концентрацій електролітів спостерігаються явні ознаки коагуляції, оскільки відбувається стиснення подвійного шару та відповідне зменшення гідратних оболонки, що дозволяє колоїдним частинкам зближуватися на відстань, при якій енергія їхнього взаємного тяжіння перевищує енергію теплового (броунівського) руху. Зміна товщини дифузного шару характеризується величиною електрокінетичного потенціалу ( $\zeta$ -потенціалу). Чим сильніше розмитий дифузний шар, тим вище  $\zeta$ -потенціал і навпаки, при граничному стисканні дифузного шару  $\zeta$ -потенціал наближається до нуля. При значенні  $\zeta$ -потенціалу,  $\zeta = 0$ , колоїдна частинка не несе на собі заряд по відношенню до середовища, тому гідратна оболонка мінімальна. Такому ізоелектричному стану частинок відповідає мінімальна стійкість системи та найбільш виражена коагуляція.

За даними А. М. Когановського та інших авторів у процесі очищення води використовується лише близько 50-60% адсорбційної поверхні гідроксиду алюмінію.

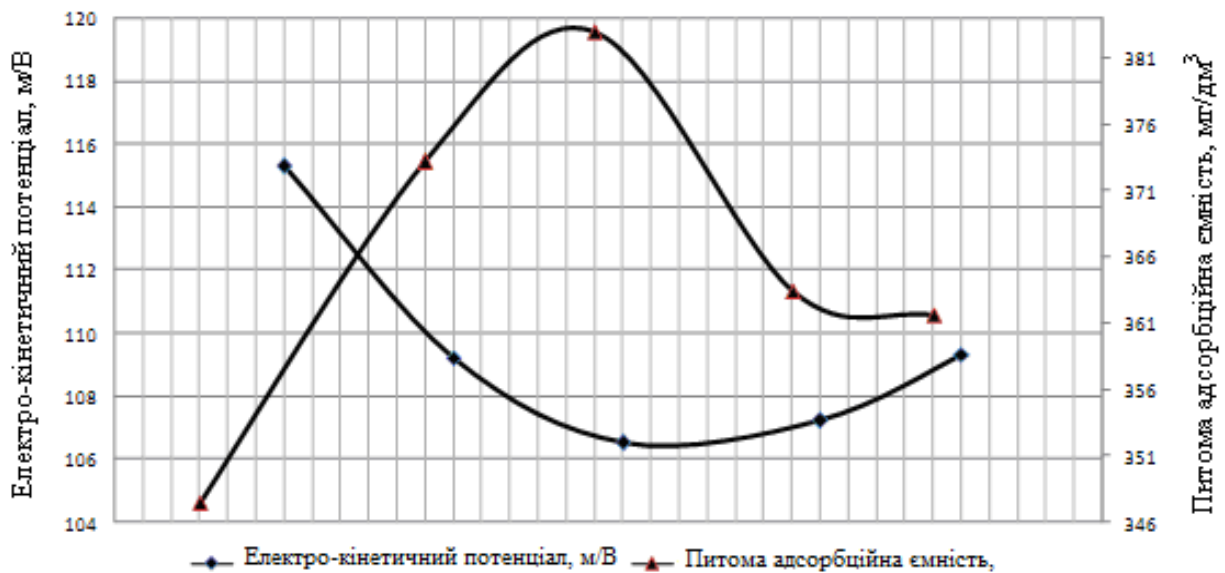
Вплив модифікації розчину сульфату алюмінію на величину електрокінетичного потенціалу коагульованих домішок та питому адсорбційну ємність гідроксиду алюмінію показано в Таблиці 5 та на Рисунку 9.

Таблиця 5. Ефективність впливу модифікованого розчину сульфату алюмінію на  $\zeta$ -потенціал коагульованих домішок та питому адсорбційну ємність гідроксиду алюмінію

Величина електрокінетичного потенціалу		Зниження величини електрокінетичного потенціалу, %	Величина довірчого інтервалу ( $\gamma = 0,95, n = 4$ )	Питома адсорбційна ємність, мг/дм <sup>3</sup>	Збільшення питомої адсорбційної ємності, %	Величина довірчого інтервалу ( $\gamma = 0,95, n = 4$ )
Звичайний розчин, мВ	Модифікований розчин, мВ					
125,7	–	–	124,8 < $\alpha$ < 126,9	315,5	–	314,1 < $\alpha$ < 316,4
-//-	115,2	8,3	114,5 < $\alpha$ < 116,3	347,4	10,1	345,2 < $\alpha$ < 349,8
-//-	109,3	13,0	108,1 < $\alpha$ < 110,2	373,2	16,6	369,1 < $\alpha$ < 377,1
-//-	106,5	15,0	105,2 < $\alpha$ < 107,7	383,01	21,4	380,4 < $\alpha$ < 383,6

Зниження агрегативної стійкості коагульованих домішок та збільшення адсорбційної ємності гідроксиду алюмінію при модифікації розчину сульфату алюмінію дозволяє інтенсифікувати процеси коагуляції при очищенні води у горизонтальних відстійниках.

Оцінка надійності результатів виконаних експериментів (Табл. 5) показує хорошу відтворюваність дослідних даних у межах довірчого інтервалу, розрахованого на підставі чотирьох паралельно виконаних дослідів.



Вміст завислих домішок, мг/дм³	15	35	60	85	110
--------------------------------	----	----	----	----	-----

Примітка:  $\zeta$ -потенціал коагульованих домішок та питому адсорбційна ємність гідроксиду алюмінію, що не піддався модифікації відповідно становить 125,7 мВ та 315 мг/дм³.

Рис. 9. Вплив модифікованого розчину сульфату алюмінію на величину  $\zeta$ -потенціалу золь та питому адсорбційну ємність гідроксиду алюмінію

Вплив модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію на гідравлічну крупність коагульованої зависі, каламутність та забарвленість проясненої води. Гідравлічна характеристика контактного середовища відстійника визначається швидкістю осідання та ступенем однорідності зависі. Від неї залежить швидкість руху води у відстійнику, а, отже, і його продуктивність.

При визначенні гідравлічної характеристики зависі контактного середовища відстійника мають бути дотримані такі умови: у відібраних для дослідження пробах зависі має зберігатися такі ж розміри частинок і об'ємну концентрацію, як у робочій зоні відстійника. Для цього при відборі проб не повинно відбуватися розбивання пластівців осідання, їх осідання та укрупнення.

Процентні швидкості осідання коагульованої зависі наведено на Рис. 10. Кількість зависі, що випала в осад з тією чи іншою гідравлічною крупністю в період весняного паводку вище в порівнянні із зимовим періодом. Це відноситься до осідання зависі у воді, обробленій модифікованим та звичайним розчинами коагулянту сульфату алюмінію. Кількість зависі, що осіла у воді, обробленою модифікованим розчином коагулянту, значно вище, ніж при звичайній коагуляції. Зимовий період: завись крупністю 0,1 мм/с – звичайний коагулянт 38%, модифікований – 92%. Період весняної повені – відповідно 60% та 95%. Зі збільшенням гідравлічної крупності коагульованої зависі ефективність видалення завислих речовин трохи знижується: Найбільша кількість зависі при обробці модифікованим розчином спостерігається для гідравлічної крупності 0,1мм/с, а найменша – 1,2 мм/с.

Аналогічна картина має місце при звичайній коагуляції, але кількість зависі, що випала в першому випадку, правда, при гідравлічній крупності 1,2 мм/с і нижче, ніж при 0,1 мм/с і більше – 15% (звичайна коагуляція), 24% (модифікований коагулянт) – зимовий період, відповідно 19% та 41% – період весняної повені.

Дослідження показали, що обробка води модифікованим розчином коагулянту дозволяє збільшити гідравлічну крупність завислих речовин, що коагулюються, при цьому збільшується кількість зависі, що осідає з тією чи іншою гідравлічною крупністю, що дає можливість підвищити ефект прояснення води в горизонтальних відстійниках.

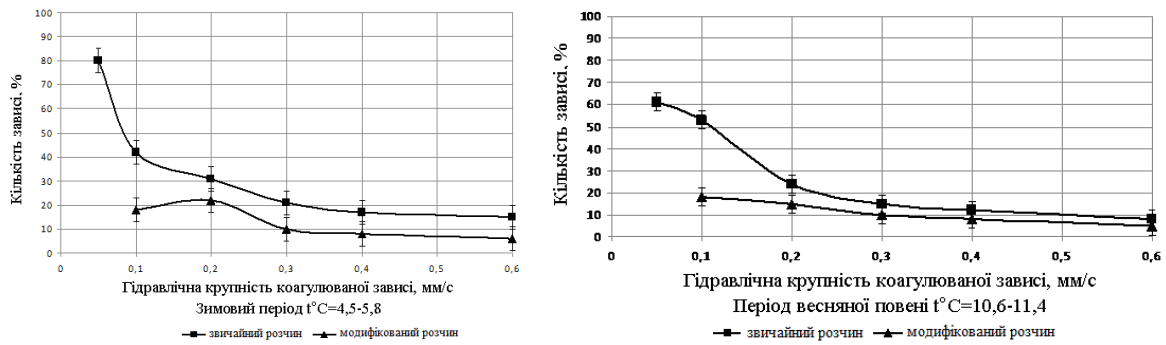


Рис. 10. Вплив модифікованого розчину  $Al_2(SO_4)_3$  на гідравлічну крупність зависі

Вплив модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію на швидкість осідання коагульованої зависі наведено на Рисунку 11.

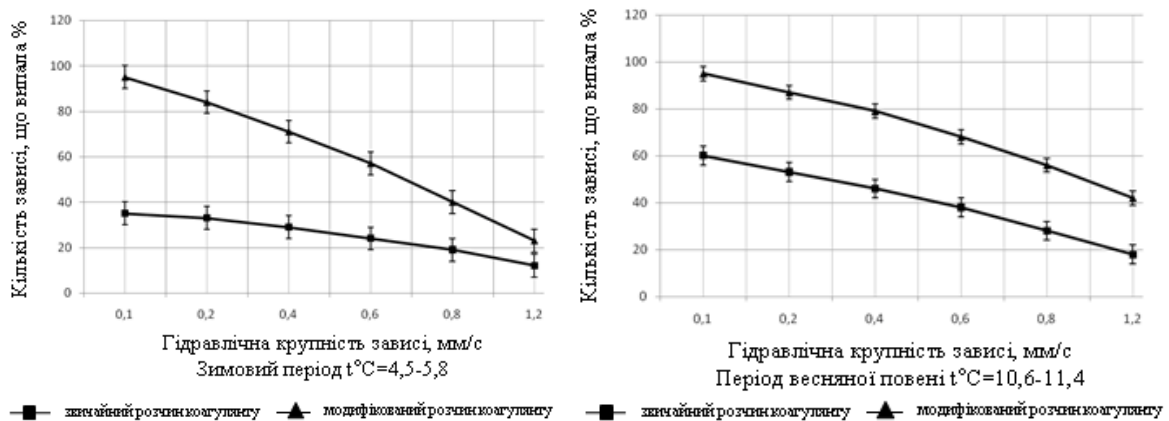


Рис. 11. Вплив модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію на швидкість осідання коагульованої зависі

Вплив модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію на знебарвлення природних вод наведено у Таблиці 6.

Таблиця 6. Вплив модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію на знебарвлення природних вод

№ серії експерименту	Забарвленість води, що прояснюється, град ПКШ	Температура води, °С	Забарвленість води, що прояснюється, град ПКШ		Зміна забарвленості проясненої води, %	
			Модифікований розчин коагулянту	Звичайний розчин коагулянту	Модифікований розчин коагулянту	Звичайний розчин коагулянту
1	30	4,5-5,8	16	20	46,6	33,3
	50		31	42	38,0	16
	70		37	51	41,1	27,1
	100		58	72	42,0	28
2	30	10,6-11,4	17	18	43,3	40
	50		28	35	44	30
	70		35	42	50	40
	100		60	73	40	27

Ефективність знебарвлення каламутних вод при обробці води модифікованим розчином коагулянту, залежно від вмісту завислих речовин у воді, що прояснюється, показана на Рис. 12.

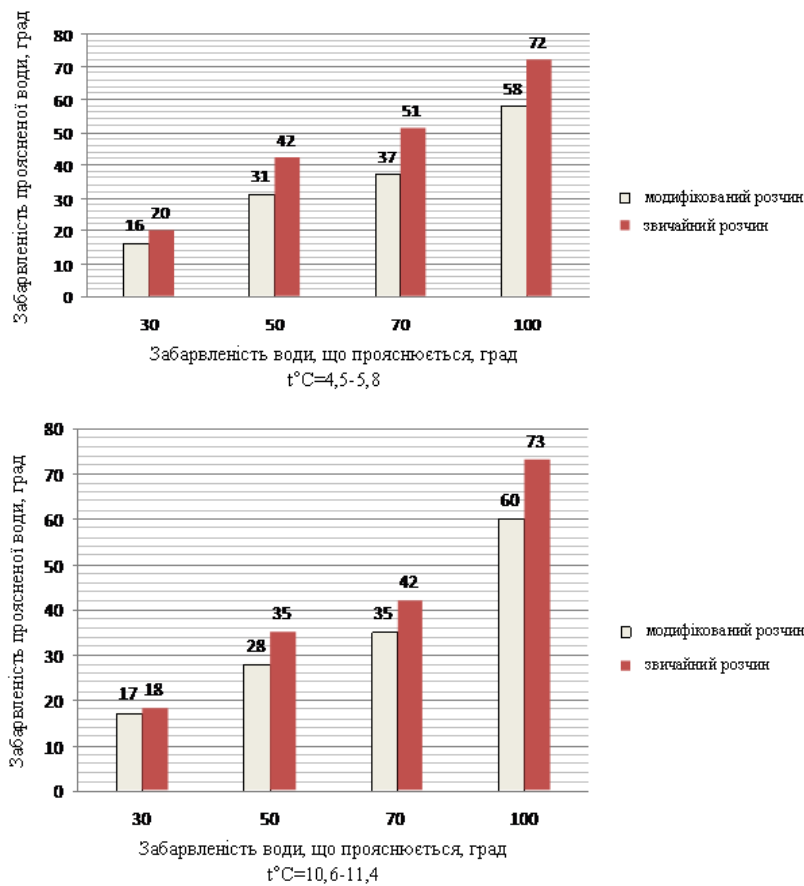


Рис. 12. Вплив модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію на знебарвлення каламутних забарвлених вод

Аналіз дослідних даних показує, що ефективність застосування модифікованого розчину коагулянту зі збільшенням вмісту завислих речовин у вихідній воді підвищується і досягає максимальних значень 100-250 мг/дм<sup>3</sup>, далі спостерігається тенденція до зменшення ефективності, хоча значення забарвленості проясненої води досить низькі, що підтверджується даними, наведеними на Рисунку 13.

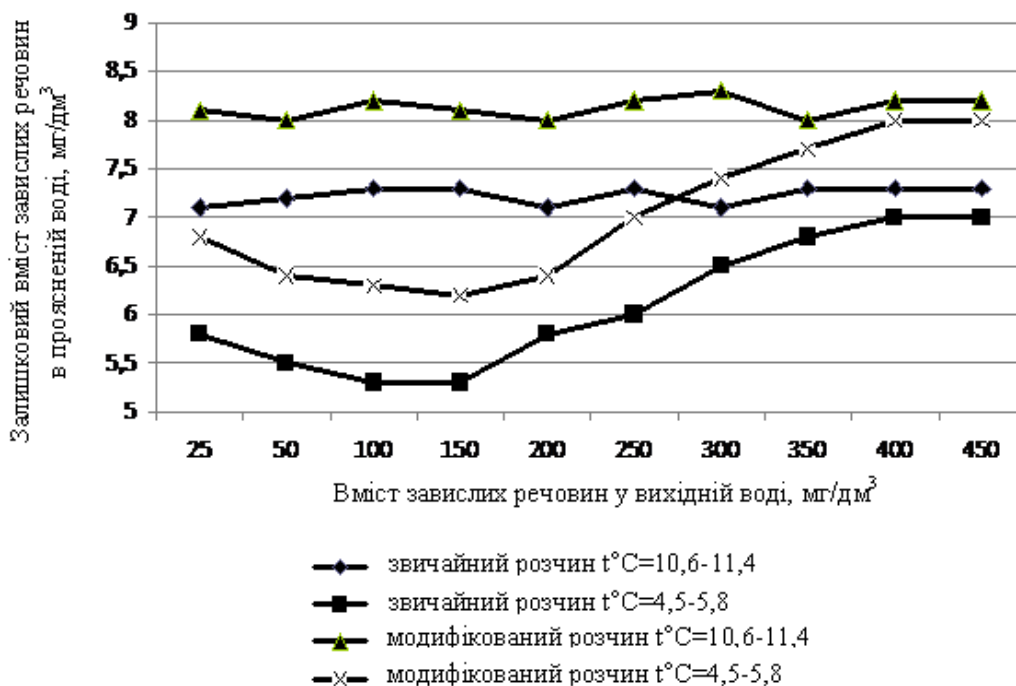


Рис. 13. Вплив модифікованого розчину коагулянту на прояснення каламутних вод

Забарвленість проясненої води при обробці її модифікованим розчином коагулянту знаходиться приблизно на одному рівні і не залежить від вмісту завислих речовин у вихідній воді.

Аналіз виконаних досліджень дозволяє зробити висновок про високу ефективність використання модифікованого розчину коагулянту при очищенні малокаламутних забарвлених та каламутно-забарвлених вод. При цьому температура води не впливає на ефективність очищення води.

*Математичне моделювання процесу прояснення води в горизонтальних відстійниках з тонкошаровими елементами.* Для ефективного аналізу механізму явищ і управління об'єктом необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, і представити їх у кількісній формі – у вигляді математичної моделі. Така модель є математичним відображенням найбільш істотних сторін процесу. Вона являє собою сукупність співвідношень (формул, рівнянь, нерівностей, логічних умов і т.д.), що визначають характеристики станів об'єкту в залежності від параметрів об'єкту, умов та часу. Модель дозволяє:

- отримати інформацію про процеси, що протікають в об'єкті;
- розрахувати характеристики об'єкту, тобто аналізувати та проектувати їх;
- отримати інформацію, яку можна використовувати для управління модельованим об'єктом.

Однією з важливих цілей при опрацюванні та запуску процесів з безперервним характером виробництва є визначення та підтримання оптимального режиму процесу. Оптимізацію розробленої установки щодо прояснення воді у відстійниках з тонкошаровими модулями можна виконати тільки за допомогою математичних моделей технологічних процесів, тобто залежностей ефекту очищення води від показників якості води.

Для вирішення даної задачі оптимізації був обраний математичний метод обробки експериментальних даних, це дає можливість отримати найбільш достовірні емпіричні залежності при порівняно невеликій кількості дослідів. Цей метод є об'єднання теоретичного і експериментального дослідження об'єкта управління. При цьому вид математичної моделі визначається теоретичними дослідженнями, а коефіцієнти моделі розраховуються на підставі експериментальних даних, і відповідно, несуть на собі похибку експерименту. Для успішного застосування математичної моделі під час вирішення завдань оптимізації проводиться перевірка її адекватності реальному процесу.

Застосування даного методу оптимального планування експерименту дає можливість варіювати не одним, а кількома факторами одночасно. Цінність цього методу полягає в тому, що оцінюється не тільки вплив кожного фактору, а й отримують інформацію про їх взаємодію<sup>100</sup>.

Прогнозування ефективності прояснення води у горизонтальних відстійниках з тонкошаровими модулями дозволяє налагодити роботу системи очисних споруд в залежності від якісних показників вихідної води. Прогноз складається на базі експериментальних даних. Для того щоб він був найбільш точним, експеримент необхідно проводити диференційно за сезонами року з максимально можливою кількістю точок.

При плануванні за схемою повного факторного експерименту (ПФЕ) реалізуються всі можливі комбінації факторів на всіх обраних для дослідження рівнях. ПФЕ дозволяє отримувати кількісні оцінки основних ефектів та ефектів взаємодії. Цікаві ефекти визначаються з меншою помилкою, ніж при традиційних методах дослідження. Застосування ПФЕ значно підвищує ефективність експерименту<sup>101</sup>.

<sup>100</sup> Душкин С. С., Булгакова О. В. (2011). Механизм влияния активированных растворов на состояния водно-дисперсных систем, с. 85.

<sup>101</sup> Эпоян С. М., Сизова Н. Д., Душкин С. С. (2014). Моделирование технологических процессов очистки питьевой воды при использовании активированного раствора коагулянта, с. 125.

В роботі експеримент проводиться на двох рівнях із варіюванням трьох факторів. Тому постановка за таким планом називається ПФЕ типу  $2^3$ . Рівні факторів являють собою межі досліджуваної області за даним параметром.

Як основні фактори, що впливають на прояснення природних вод були обрані наступні:

- забарвленість,  $Z$ , град;
- доза реагенту, що вводиться,  $D$ , мг/дм<sup>3</sup>;
- температура води,  $T$ , °С.

Експериментальні дослідження проводилися в різні пори року з різними показниками якості вихідної води, що було враховано під час планування експерименту.

Функціональна залежність ефекту очищення природних вод має вигляд:

$$E = f(Z, D, T) \text{ или } Y = f(X_1, X_2, X_3) \quad (24)$$

Відповідно математична залежність для ПФЕ типу  $2^3$  матиме наступний вигляд:

Як основні фактори, що впливають на прояснення природних вод у горизонтальних відстійниках були обрані наступні:

- вміст завислих речовин,  $M$ , мг/дм<sup>3</sup>;
- доза реагенту, що вводиться,  $D$ , мг/дм<sup>3</sup>;
- температура води,  $T$ , °С.

Експериментальні дослідження проводилися в різні пори року з різними показниками якості вихідної води, що було враховано під час планування експерименту.

Функціональна залежність ефекту очищення природних вод має вид:

$$E = f(M, D, T) \text{ или } Y = f(X_1, X_2, X_3) \quad (25)$$

У загальному вигляді функціональна залежність, описана рівняннями (6.1 та 6.2), має вигляд:

$$Y = b_0 X_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (26)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$  – коефіцієнти регресії.

Ступінь точності математичної моделі визначається діапазоном зміни факторів: для кожного  $i$ -го фактора встановлюється  $X_{i0}$  – основний рівень фактора;  $X_{i \max}, X_{i \min}$  – верхній та нижній рівні  $i$ -го фактора, що приймаються під час досліджень;  $\Delta X_i$  – інтервал варіювання рівний

$$\Delta X_i = \frac{X_{i \max} - X_{i \min}}{2}, i = 1 \dots k \quad (27)$$

Під час проведення експерименту використовуються кодовані значення рівнів чинників. При цьому основний рівень приймається рівним нулю, верхній – +1, а нижній – -1. Кодування здійснюється за формулою

$$\bar{X}_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, i = 1 \dots k \quad (28)$$

Умови планування експерименту наведені в Таблиці 7.

Таблиця 7. Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Найменування	Кодовий вид	-1	0	+1	
Коагулянт – сульфат алюмінію					
Забарвленість, град	$X_1$	35	65	95	30
Доза реагенту, мг/дм <sup>3</sup> ;	$X_2$	25	50	75	25
Температура води, °С	$X_3$	3	12	21	9

Для прогнозування ефекту прояснення води при застосуванні модифікованого розчину сульфату алюмінію було проведено серію дослідів, було визначено значення забарвленості до та після лабораторної установки.

Результати експерименту наведені в Таблиці 8.

Таблиця 8. Ефективність очищення природних забарвлених вод при застосуванні модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію

№ експерименту	Початковий вміст забарвленості, град;	Кількість паралельних дослідів	Забарвленість в проясненій воді, град	Ефект очищення, %	Середнє значення ефекту очищення, %
1	95	3	17	82,30	83,10
				82,20	
				84,80	
2	95	3	19	80,20	80,00
				79,70	
				80,10	
3	92	3	18	81,1	80,43
				79,49	
				80,73	
4	89	3	20	76,53	77,52
				77,21	
				78,83	
5	92	3	19	79,42	80,35
				80,16	
				81,46	
6	94	3	20	77,68	78,77
				78,72	
				79,91	
7	83	3	17	81,48	80,68
				79,68	
				80,88	
8	89	3	18	78,37	79,77
				78,15	
				82,80	

Матриця планування ПФЕ та результати експериментів наведено у Таблиці 9.

Таблиця 9. Матриця планування ПФЕ та результати експериментів

Номер дослідів	Матриця планування				Паралельні дослідів			Середнє значення параметру, $\bar{E}_{зи}, \%$	Оцінка дисперсії, $S_j^2$
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	1	2	3		
1	+1	+1	-1	+1	82,3	82,2	84,8	83,10	2,17
2	+1	-1	+1	+1	80,20	79,70	80,10	80,00	0,07
3	+1	+1	-1	-1	81,10	79,49	80,73	80,44	0,7111
4	+1	-1	-1	-1	76,53	77,21	78,83	77,52333	1,396133
5	+1	+1	+1	+1	79,42	80,16	81,46	80,34667	1,066533
6	+1	-1	+1	-1	77,68	78,72	79,91	78,77	1,2451
7	+1	+1	+1	-1	81,48	79,68	80,88	80,68	0,84
8	+1	-1	-1	+1	78,37	78,15	82,80	79,77333	6,882633
Σ									14,3815

Розрахунок коефіцієнтів регресії нелінійної моделі парного впливу факторів наведено в Таблиці 10.



Таблиця 10. Розрахунок коефіцієнтів регресії нелінійної моделі парного впливу факторів

Номер досліджу	Матриця планування				Середнє значення параметру, $\bar{E}_{zn}, \%$	Розрахунки для коефіцієнтів регресії						
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>		b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>
1	1	1	-1	1	83,1	83,1	83,1	-83,1	83,1	-83,1	83,1	-83,1
2	1	-1	1	1	80,00	80,00	-80,00	80,00	80,00	-80,00	-80,0	80,00
3	1	1	-1	-1	80,73	80,73	80,73	-80,73	-80,73	-80,73	-80,73	80,73
4	1	-1	-1	-1	78,83	78,83	-78,83	-78,83	-78,83	78,83	78,83	78,83
5	1	1	1	1	81,46	81,46	81,46	81,46	81,46	81,46	81,46	81,46
6	1	-1	1	-1	79,91	79,91	-79,91	79,91	-79,91	-79,91	79,91	-79,91
7	1	1	1	-1	80,88	80,88	80,88	80,88	-80,88	80,88	-80,88	-80,88
8	1	-1	-1	1	82,8	82,8	-82,8	-82,8	82,8	82,8	-82,8	-82,8
Σ						647,71	4,63	-3,21	7,01	0,23	-1,11	-5,67

Рівняння нелінійної регресії має вид:

$$Y = 80,96 + 0,579X_1 - 0,40X_2 + 0,879X_3 + 0,029X_1X_2 - 0,139X_1X_3 - 0,709X_2X_3 \quad (29)$$

Для оцінки значущості коефіцієнтів регресії необхідно визначити:

– оцінку дисперсії відтворюваності

$$S_y^2 = \frac{1}{8}14,38 = 1,798; f = 8 \cdot (3 - 1) = 16;$$

– оцінку дисперсії середнього результату

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{1,798}{3} = 0,599; f = 8 \cdot (3 - 1) = 16.$$

Звідси похибка у визначенні коефіцієнтів регресії

$$S_b = \sqrt{\frac{0,599}{8}} = 0,274.$$

Відповідно для довірчої ймовірності  $P = 0,95$  та 16 ступенів свободи значення критерію Стьюдента  $t = 2,12$ . Тоді

$$S_b \cdot t = 0,274 \cdot 2,12 = 0,58.$$

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що тільки коефіцієнти регресії  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_3$  і  $b_6$  значущі, оскільки  $|b| > 0,58$ .

Отже, шукане рівняння регресії матиме вигляд:

$$Y = 80,96 + 0,58X_1 + 0,879X_3 - 0,709X_2X_3. \quad (30)$$

Для перевірки адекватності даного рівняння регресії визначимо розрахункові значення функції відгуку:

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= 80,96 + 0,58 + 0,879 + 0,709 = 83,128; & Y_2 &= 80,96 - 0,58 + 0,879 - 0,709 = 80,55; \\
 Y_3 &= 80,96 + 0,58 - 0,879 - 0,709 = 79,952; & Y_4 &= 80,96 - 0,58 - 0,879 - 0,709 = 78,792; \\
 Y_5 &= 80,96 + 0,58 + 0,879 - 0,709 = 81,71; & Y_6 &= 80,96 - 0,58 - 0,879 + 0,709 = 80,21; \\
 Y_7 &= 80,96 + 0,58 - 0,879 + 0,709 = 81,37; & Y_8 &= 80,96 - 0,58 + 0,879 + 0,709 = 81,968.
 \end{aligned}$$

Розраховуємо оцінку дисперсії адекватності:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{8-4} \left[ (83,1 - 83,128)^2 + (80,0 - 80,55)^2 + (80,43 - 79,952)^2 + (77,52 - 78,792)^2 + (80,35 - 81,71)^2 + (78,77 - 80,21)^2 + (80,86 - 81,37)^2 + (79,77 - 81,968)^2 \right] = 0,499.$$

Розрахункове значення критерію Фішера дорівнюватиме

$$F_p = \frac{0,499}{0,599} = 0,833,$$

що не перевищує табличного значення, що дорівнює 2,9.

Отже, рівняння регресії адекватно, тобто отримана функціональна залежність достовірно описує досліджуваний процес очищення каламутних забарвлених вод при застосуванні модифікованого розчину сульфату алюмінію коагулянту і має вигляд:

$$E = 80,96 + 0,58 \cdot Z + 0,879 \cdot T - 0,709 \cdot D \cdot T. \quad (31)$$

На Рисунку 14 показано зіставлення даних про ефект очищення природних вод при використанні модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію дослідним шляхом (експериментальним) та розрахунковим (математична модель).

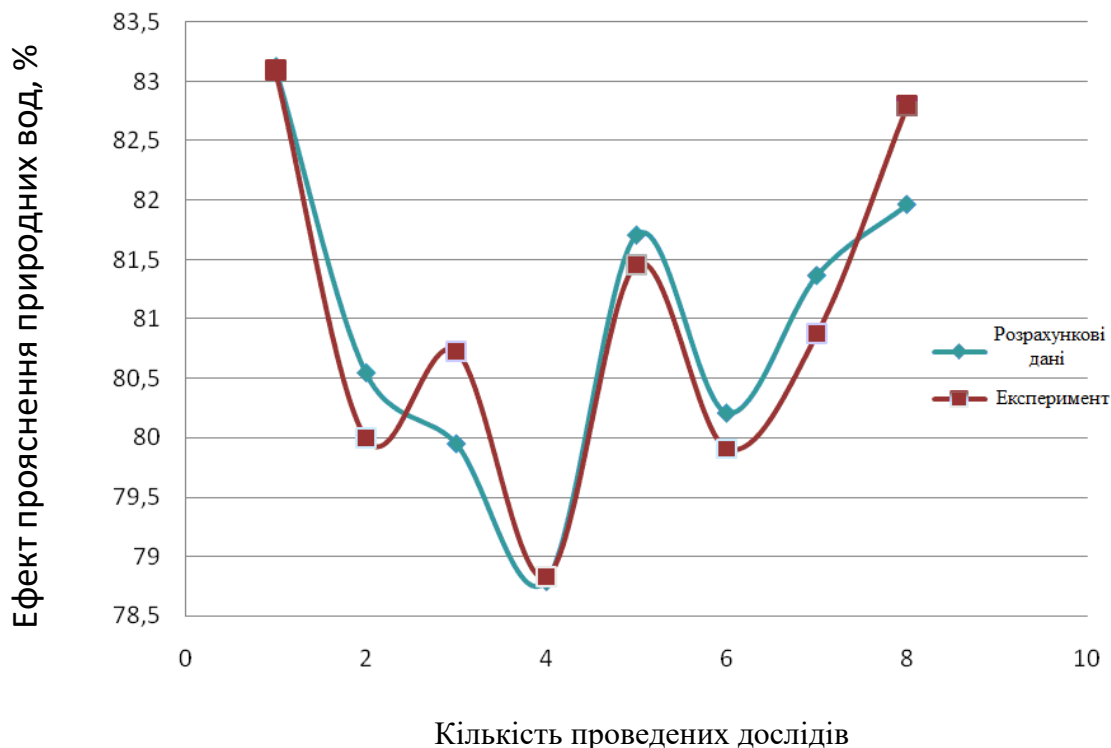


Рис. 14. Зіставлення експериментальних та розрахункових даних щодо ефекту прояснення природних вод при застосуванні модифікованого розчину сульфату алюмінію

### *Висновки.*

1. В роботі вирішено важливе науково-практичне завдання, яке полягає у науковому обґрунтуванні застосування розчину реагенту сульфату алюмінію, який піддавався модифікованій активації для інтенсифікації роботи горизонтальних відстійників з тонкошаровими елементами при очищенні природних вод, що дозволяє на очисних спорудах систем водопостачання: знизити витрати реагенту, поліпшити якість прояснення оброблюваної води за завислими речовинами та забарвленістю, збільшити продуктивність горизонтальних відстійників з тонкошаровими елементами та знизити собівартість очищення природних вод.

2. Розглянуто теоретичні передумови поліпшення роботи горизонтальних відстійників з тонкошаровими модулями за допомогою модифікованого розчину коагулянту. Показано, що поліпшення фізико-хімічних умов коагуляції домішок при проясненні можна пояснити наступними факторами:

- зменшенням ступеня структурно-механічної гідратації коагульованих домішок та збільшенням розмірів і питомої ваги коагуляційних структур, у зв'язку з чим процеси прояснення та знебарвлення води інтенсифікуються, що дозволяє покращити параметри роботи горизонтальних відстійників з тонкошаровими модулями та отримати воду необхідної якості;

- зниженням агрегативної стійкості колоїдних систем та збільшенням адсорбційної ємності гідроксиду алюмінію, що сприяє поліпшенню процесу коагуляції;

- виконані дослідження доводять можливість збільшення сил зчеплення між частинками контактної середовища за допомогою модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію, що дає змогу підвищити ефект очищення води та знизити розрахункові дози коагулянту.

3. Отримано математичні залежності методом повного факторного експерименту для прогнозування ефекту очищення води за різних показників якості води та дози коагулянту сульфату алюмінію, що вводиться. Зіставлення даних, отриманих дослідним та розрахунковим шляхом дозволило зробити висновок про можливість використання математичних залежностей для практичних цілей, в технологічних розрахунках очисних споруд та обґрунтуванні використання модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію для інтенсифікації процесу прояснення води у горизонтальних відстійниках з тонкошаровими модулями.

4. Доведено, що використання модифікованого розчину коагулянту дозволяє без погіршення якості прояснення води знизити розрахункові дози коагулянту в середньому на 25-30%, що підтверджує доцільність використання модифікованого розчину коагулянту сульфату алюмінію при проясненні води у горизонтальних відстійниках з тонкошаровими модулями.

5. Встановлено, що обробка води, що прояснюється, модифікованим розчином коагулянту сульфату алюмінію дозволяє знизити залишковий вміст алюмінію в проясненій воді в середньому на 50-54%.

### *Література*

1. Булгакова О. В. Изменение структурно-механической гидратации гидроксида алюминия при обработке воды активированным раствором коагулянта. Харьков: ХНАГХ, 2010. С. 145-146.

2. Булгакова, О. В. Физико-химические основы осветления воды в горизонтальных отстойниках с тонкослойными элементами. К.: Техника, 2010. Вып. 93. С. 329-333.

3. Володченко О. В. Анализ методов интенсификации работы очистных сооружений. К.: Техника, 2002. Вып. 36. С. 267-270.

4. Демура М. В. Горизонтальные отстойники. К.: Госстройиздат УССР, 1963. 56 с.

5. Душкин С. С. Методологические аспекты проведения исследований при использовании активированных растворов коагулянта в процессе очистки воды. Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. Харків: ХНАМГ, 2012. Вип. 105. С. 320-334.
6. Душкин С. С. Улучшение технологии очистки природных и сточных вод магнитным полем. Харьков: Выща школа, 1988. 147 с.
7. Душкин С. С., Булгакова О. В. Механизм влияния активированных растворов на состояния водно-дисперсных систем. Сб. докладов IV международной науч-практ. Конференции. Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. С. 48-51.
8. Душкин С. С., Дем'янюк В. М., Булгакова О. В., Котюк Ф. А. Пристрій для активації реагентів. Пат. України на корисну модель № 4552, опубл. 17. 05. 2005, бюл. № 1.
9. Найманов А. Я., Никиша С. Б., Насонкина Н. Г. и др. Водоснабжение. Макеевка, 2006. 654 с.
10. Эпоян С. М., Благодарная Г. И., Душкин С. С. Повышение эффективности работы сооружений при очистке питьевой воды: монография. Харьков: ХНАГХ, 2013.
11. Эпоян С. М., Сизова Н. Д., Душкин С. С. Моделирование технологических процессов очистки питьевой воды при использовании активированного раствора коагулянта. Наук. вісник будівництва. Харків: ХНУБА. ХОТВ АБУ, 2014. Вип. № 2 (76). С. 125-129.
12. Dushkin S., Martynov S., Dushkin S. (2019). Intensification of the work of contact clarifiers of drinking water preparation. Journal of Water and Land Development. № 41 (IV-VI), p. 55-60. DOI: 10.2478/jwld-2019-0027.