

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: «Розроблення системи автоматичного контролю накипоутворення в оборотних системах водного господарства промислових підприємств»

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи КАЗ-41 спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Петруняк В.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Медвідь В.Р.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Козбур І.Р.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Савків В.Б.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Чихіра І.В.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Петруняк Валентина Вікторівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення системи автоматичного контролю накипоутворення в оборотних системах водного господарства промислових підприємств».

Керівник роботи к.т.н., доц., Медвідь В.Р.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджена наказом ректора від « 14 » травня 2026 року № 4/9-231

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики та вимоги системи водного господарства підприємства

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Аналітична частина;

2) Проектна частина;

3) Спеціальна частина;

4) Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Презентація кваліфікаційної роботи аркушів формату А4

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Спеціальна частина</i>	<i>доц. Медвідь В.Р.</i>		
<i>Безпека життєдіяльності, основи хорони праці</i>	<i>доц. Сенчишин В.С.</i>		

« _____ » _____ 20 _____ p.

[illegible]

Петруняк В.В.
(прізвище та ініціали)

Медвідь В.Р.

 (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У роботі розроблено математичний опис процесів осадження солей жорсткості на поверхнях теплообміну з урахуванням фізико-хімічних закономірностей фазоутворення на межі розділу «рідина – тверде тіло». Запропоновано комплекс математичних моделей, що дозволяють здійснювати кількісну оцінку швидкості накипоутворення, прогнозувати зміну експлуатаційних характеристик теплообмінного обладнання та визначати оптимальні параметри функціонування системи в умовах нестационарних режимів роботи.

Особливістю дослідження є врахування впливу технологічних способів регулювання температурного режиму циркуляційної води шляхом зміни її витрати через дроселювання потоку або регулювання частоти обертання насосних агрегатів. Це забезпечує адекватне відтворення реальних умов експлуатації промислових систем оборотного водопостачання та підвищує точність прогнозування процесів солевідкладення.

Розроблені моделі мають універсальний характер і можуть бути адаптовані до різних схем оборотного водопостачання незалежно від галузі промисловості та конструктивних особливостей обладнання. Адекватність запропонованого математичного апарату передбачається підтвердити шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними, отриманими на діючих промислових об'єктах.

Практичне значення роботи полягає у створенні науково обґрунтованих підходів до автоматизованого керування водно-хімічними режимами оборотних систем, що дозволяє зменшити інтенсивність накипоутворення, підвищити енергоефективність теплообмінного обладнання, скоротити витрати підживлювальної води та знизити негативний вплив виробництва на навколишнє середовище.

Ключові слова: НАКИПОУТВОРЕННЯ, СОЛЕВІДКЛАДЕННЯ, ОБОРОТНЕ ВОДОПОСТАЧАННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕПЛООБМІННЕ ОБЛАДНАННЯ, ВОДНО-ХІМІЧНИЙ РЕЖИМ.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Охолоджуючі системи оборотного водопостачання	
1.2 Баланс води в системах	11
1.3 Методи і запобігання всіх відкладень у оборотних системах водного господарства	12
1.4 Охолодження оборотної води	15
1.5 Технічні умови будівництва оборотних систем	17
1.6 Контроль за роботи оборотних систем	20
2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА	22
2.1 Системи охолодження конденсаторів водного господарства	24
2.2 Визначення розрахункових метеорологічних параметрів	24
2.3 Теплотехнічний розрахунок градирні	24
2.4 Аеродинамічний розрахунок градирні	28
2.5 Конденсатори	31
2.6 Підбір циркуляційних насосів	32
2.7 Розрахунок і підбір насосного обладнання	33
2.8 Розрахунок трубопроводів подачі води	34
2.9 Режим охолоджуючої води в оборотних системах водопостачання	35
2.10 Принцип роботи пристроїв МПВ MWS	37
2.11 Вплив магнітного поля на властивості води і її домішок	39
2.12 Магнітне поле і кристалізація	42
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	44
3.1 Магнітна обробка води	44
3.2 Вибір і обґрунтування місця встановлення магнітного апарату	46
3.3 Розрахунки та конструювання магнітного апарату	46
3.4 Робота установки АМА-25000	50
3.5 Знешкодження відкладень, які утворюються на внутрішній поверхні теплообмінних апаратів системи зворотнього водопостачання	53

3.6 Автоматизація процесу охолодження у конденсаторах турбін і роботи апарату АМА-25000	54
3.7 Опис функціональної схеми автоматизації	55
3.8 Дослідження оборотних охолоджуючих систем водопостачання за допомогою математичного моделювання	56
3.9 Режим охолоджуючої води в об'єктних системах водопостачання	59
3.10 Математичне моделювання режимів роботи оборотних систем водопостачання	60
3.11 Розрахунок та моделювання САР	70
3.12 Дослідження контура регулювання	71
3.13 Розрахунок перехідної характеристики	73
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	76
4.1 Безпека життєдіяльності	76
4.2 Основи охорони праці	77
ВИСНОВКИ	81
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	83

ВСТУП

Одним із перспективних і ефективних методів боротьби з утворенням відкладень є магнітна активація охолоджуючої води. У рамках основних напрямків економічного та соціального розвитку країни поставлено важливе завдання — у найближчі роки забезпечити виробництво обладнання, що відповідає світовим техніко-економічним стандартам, а також впровадити передові технології для раціонального використання природних ресурсів та охорони навколишнього середовища.

Протягом експлуатації у воді циркуляційної системи збільшується вміст солей, з'являються відкладення на внутрішній поверхні теплообмінних апаратів, що значно підвищують ризик виникнення аварійних ситуацій.

Одним з перспективних, ефективних методів боротьби з утворенням відкладів є магнітна активація охолоджуючої води.

Важливу роль у цьому відіграє автоматизація управління технологічними процесами обробки води із застосуванням мікропроцесорів і мікро-ЕОМ. Необхідність автоматизації обумовлена жорсткими вимогами до точного виконання технологічних операцій, підвищенням продуктивності та покращенням якості очищення води.

Можливості мікропроцесорів і мікро-ЕОМ дозволяють контролювати параметри процесу, виконувати логічні операції, локально керувати агрегатами, проводити діагностику стану процесу та обладнання, а також обробляти вимірювальні дані за допомогою математичних моделей. Це сприяє більш раціональному управлінню технологічними процесами обробки води, підвищенню точності та надійності контролю й керування.

Відомо, що введення в експлуатацію сучасних систем управління технологічними процесами займає значний час і потребує кваліфікованого персоналу. Незважаючи на це, часто системи вводяться в дію з налаштуваннями, які не є оптимальними, що призводить до економічних втрат і уповільнює запуск. Крім того, при створенні й впровадженні автоматизованих комплексів з магнітної активації води виникають труднощі,

пов'язані з недостатньою обізнаністю спеціалістів у галузі автоматизації та мікропроцесорної техніки.

Аналіз існуючих конструкцій, таких як магнітні апарати АМА-25000, показує необхідність удосконалення систем управління.

Цей підхід є класичним і дуже ефективним інженерним рішенням. Використання математичного моделювання замість суто емпіричних спостережень дозволяє прогнозувати поведінку системи за будь-яких умов, що є критично важливим для промислових оборотних систем.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Охолоджуючі системи оборотного водопостачання

В умовах сучасного промислового виробництва мінімізація водоспоживання та водовідведення є одним із пріоритетних завдань для всіх галузей промисловості. Найбільші об'єми води використовуються для технологічних потреб, зокрема для охолодження агрегатів, що працюють у зонах високих температур.

Стабільне функціонування підприємств критично залежить від безперебійного та якісного водозабезпечення. Порушення режиму подачі води або погіршення її якості призводить до інтенсивного утворення сольових відкладів (накипу).

Це тягне за собою низку негативних наслідків:

- зниження ефективності: кожен міліметр накипу на поверхнях теплообміну збільшує перевитрату палива до 3%.
- зменшення пропускної здатності: звужується площа поперечного перерізу трубопроводів, що підвищує гідравлічний опір.
- знос обладнання: термін експлуатації трубопроводів та теплонавантажених охолоджувальних агрегатів скорочується у 2–3 рази.
- економічні збитки: суттєво зростають експлуатаційні витрати на ремонти та обслуговування систем.

Математичне моделювання динаміки водного режиму

Проектування оптимальних режимів оборотних систем, їх коригування під час експлуатації, а також дослідження умов накипоутворення вимагають точного врахування закономірностей динаміки водного балансу.

У зв'язку з цим виникає необхідність створення математичних моделей. Вони мають відповідати двом ключовим вимогам:

1. з достатньою математичною строгістю описувати фізико-хімічні та гідродинамічні процеси в системі.
2. мати можливість інтеграції реальних емпіричних даних, отриманих під час функціонування конкретного об'єкта.

Методи запобігання накипоутворенню

Основним методом стабілізаційної обробки та регулювання солевмісту в циркуляційних контурах є продувка системи (скидання частини мінералізованої води). Проте в більшості випадків лише продувки недостатньо.

Для досягнення безнакипного режиму її комбінують із додатковими методами:

- хімічне кондиціонування води (введення інгібіторів).
- безреагентні методи обробки (магнітна або ультразвукова активація).

Комплексна автоматизація процесу магнітної активації

Впровадження безреагентної магнітної обробки охолоджувальної води потребує створення надійної системи автоматизації, яка включає такі контури:

- автоматичне регулювання: забезпечує стабільну подачу охолодженої води в конденсатори та інші теплообмінні апарати відповідно до заданого технологічного регламенту.
- дистанційне керування: дозволяє операторам з центрального пульта здійснювати пуск, зупинку, перемикання та регулювання виконавчих механізмів на відстані.
- автоматичний контроль та моніторинг: реалізується за допомогою показуючих і реєструючих приладів, які здійснюють безперервний контроль параметрів системи в реальному часі.
- технологічні блокування та сигналізація: попереджають виникнення аварійних ситуацій, миттєво інформуючи персонал про відхилення від норми та захищаючи обладнання.

Схема водопостачання повинна прийматися з оборотом води, загальним для всього промислового підприємства, або у вигляді замкнутих циклів для окремих виробництв, цехів або установок.

Кількість охолоджуючих систем оборотного водопостачання на підприємстві слід встановлювати з урахуванням технології виробництва, вимог, що пред'являються до якості, температури, тиску води, розміщення споживачів води на генплані і черговості будівництва.

Для зменшення діаметра і протяжності труб водопровідних мереж слід застосовувати на промисловому підприємстві роздільні системи оборотного

водопостачання по окремих виробництвах, цехах або установкам з максимально можливим наближенням їх до споживачів води.

При проектуванні охолоджуючих систем оборотного водопостачання повинна враховуватися можливість використання низько потенційного тепла підігрітої води.

Систему оборотного водопостачання повинно бути з відведенням води від технологічних установок без розриву струменя з напором, достатнім для подачі води на охолоджувачі, за винятком випадків, коли розрив струменя обумовлений конструкцією установок.

Для підживлення циркуляційних контурів доцільно утилізувати промислові стічні та природні води, які пройшли комплексне очищення від домішок і спеціальну безреагентну або хімічну підготовку для запобігання корозії та накипоутворенню.

Використання очищених стічних вод повинно узгоджуватися з органами санітарно-епідеміологічної служби.

Рациональне керування водними ресурсами промислових підприємств передбачає повернення очищених стічних і природних вод у циркуляційні контури. Для захисту обладнання від корозії та накипу така вода проходить обов'язкову стадію глибокого очищення та спеціальної протинакипної підготовки

Для забезпечення зазначених вимог слід передбачати відповідне очищення і обробку додаткової і оборотної води.

1.2 Баланс води в системах

Для систем оборотного водопостачання повинен складатися баланс води, що враховує втрати, необхідні скиди і додавання води в систему для компенсації втрат з неї.

При складанні балансу до складу загальної суми збування води з системи необхідно включати:

- безповоротне споживання (відбір води із системи на технологічні потреби);

- втрати води на випаровування при охолодженні $Q_{\text{вип}}, \text{м}^3 / \text{год}$, визначаємо за формулою:

$$q_{\text{вк}} = K_{\text{вк}} \Delta t q_{\text{охл}},$$

де $\Delta t = t_1 - t_2$ різниця між температурами нагрітої води, що надходить на охолоджувальну споруду (ставок-охолоджувач, бризкальний басейн або градирню), та охолодженої води, яка повертається в систему, t_1 і охолодженої води t_2 ; $q_{\text{охл}}$ - витрата оборотної води, $\text{м}^3 / \text{год}$; $K_{\text{вип}}$ - коефіцієнт частки випаровування в загальній тепловіддачі — безрозмірний показник, що визначає долю тепла, яка відводиться за рахунок випаровування води.

Для бризкальних басейнів і градирень його значення приймають залежно від температури повітря за сухим термометром, а для ставків-охолоджувачів (водойм) — залежно від природної температури води у водотоці.

Для проміжних значень температур значення визначають інтерполяцією. Втрати води на природне випаровування у водосховищах (ставках) - охолоджувачах слід визначати за нормами для розрахунку водосховищ.

Менші значення втрат належить приймати для охолоджувачів більшої продуктивності, а також для розрахунків обробки охолоджувальної води в цілях запобігання карбонатних відкладень.

1.3 Методи і запобігання всіх відкладень у оборотних системах водного господарства

Можливість і інтенсивність утворення механічних відкладень в резервуарах градирень і в теплообмінних апаратах слід визначати на основі досвіду експлуатації систем оборотного водопостачання, розташованих в даному районі де знаходиться , що працюють на воді даного джерела, або виходячи з даних про концентрацію, гранулометричному складі (гідравлічної крупності) механічних забруднень води і повітря.

Для запобігання і видалення механічних відкладень в теплообмінних апаратах слід передбачати періодичну гідроімпульсними або гідропневматичне очищення їх в процесі роботи, а також часткове освітлення оборотної води.

Вода поверхневих джерел, яка використовується в якості додаткової в системі оборотного водопостачання, повинна піддаватися освітленню.

З метою запобігання розвитку біологічних обростань бактеріального походження в трубопроводах та теплообмінному обладнанні обґрунтовано застосування методу хлорування циркуляційної води. Оптимальну дозу активного хлору доцільно встановлювати на основі досвіду експлуатації аналогічних систем або визначати експериментально, виходячи з показника хлоропоглинання підживлювальної (додаткової) води. Подачу хлорної води від хлораторів належить проводити в приймальну камеру охолодженої води.

При високому хлоропоглинанні води і великої протяжності трубопроводів системи оборотного водопостачання допускається розосередженому введенні хлорної води в декількох точках системи.

З метою попередження обростання водоростями, бризкальних басейнів і зрошувальних теплообмінних апаратів повинна застосовуватися періодична обробка охолоджувальної води розчином мідного купоросу. Концентрацію розчину мідного купоросу в розчинній баку слід приймати 2-4%.

Для попередження біологічного обростання градирень, бризкальних басейнів і зрошувальних холодильників слід застосовувати додатково періодичне хлорування води перед спорудою. Додаткову обробку води хлором слід проводити одночасно або після обробки її розчином мідного купоросу.

Баки, лотки, трубопроводи, обладнання та запірні арматури, що стикаються з розчином мідного купоросу, повинні прийматися з корозійно-

Проектування систем оборотного водопостачання для охолодження теплообмінних апаратів, машин і агрегатів, в яких не відбувається кипіння охолоджуючої води біля поверхні теплообміну і нагрівання води не перевищує 60 °C при використанні прісних вод джерел і очищених стічних вод.

При спеціальних вимогах до охолоджувальної води при нагріванні води більше 60 °C і місцевому кипінні її у поверхні теплообміну слід приймати

пом'якшення додаткової води на іонообмінних фільтрах (натрій-катіоніровання або водень- катіоніровання з "голодною" регенерацією); допускається застосування вапнування з послідовним підкисленням або фосфатуванням.

При цьому слід приймати такі методи обробки води: підкислення, рекарбонізацію, фосфатування поліфосфатами і комбіновану фосфатно-кислотну обробку. Допускається застосування фосфорорганічних сполук.

Методи запобігання карбонатним відкладенням слід обирати з урахуванням таких рекомендацій: підкислення — доцільно застосовувати незалежно від показників лужності та загальної жорсткості вихідної води, а також значення коефіцієнта упарювання в системі

Методи обробки води для запобігання карбонатних відкладень слід приймати:

- підкислення - при будь-яких величинах лужності і загальної жорсткості природних вод і коефіцієнтах упарювання води в системах;
- фосфатування - при лужності додаткової води $\text{Щ}_{\text{доб}}$ до 5,5 мг-екв/л;
- комбіновану фосфатно-кислотну обробку води - у випадках, коли фосфатування не запобігає карбонатних відкладень або величина продувки економічно недоцільна;
- рекарбонізацію димовими газами або газоподібної вуглекислотою - при лужності додаткової води до 3,5 мг-екв/л і коефіцієнтах упарювання, що не перевищують 1,5.

Запобігання сульфатних відложень

Для запобігання відкладень сульфату кальцію утворення активних концентрацій іонів Ca^{2+} і SO_4^{2-} в оборотній воді не повинно перевищувати утворенню розчинності сульфату кальцію.

Для підтримки величин твори активних концентрацій іонів Ca^{2+} і SO_4^{2-} в зазначених межах слід приймати відповідний коефіцієнт упарювання оборотної води шляхом зміни величини продувки системи або часткового зниження концентрацій іонів Ca^{2+} і SO_4^{2-} в додаткової воді.

Для боротьби з сульфатними відкладеннями в системах оборотного водопостачання належить приймати обробку води триполіфосфатом натрію дозою 10 мг / л по PO_4^{3-} або карбоксиметилцелюлозою дозою 5 мг/л.

Протикорозійний захист трубопроводів та теплообмінного обладнання реалізується шляхом введення інгібіторів, нанесення захисних покриттів або застосування методів електрохімічного захисту. Використання хімічних інгібіторів та покриттів вимагає обов'язкового попереднього очищення внутрішніх поверхонь системи від наявних відкладень і біобіотів. Як реагенти-інгібітори доцільно використовувати триполіфосфат або гексаметафосфат натрію, силікат натрію, нітрит натрію, сучасні фосфорорганічні сполуки, а також високоефективні трикомпонентні композиції (на основі поліфосфатів натрію, сульфату цинку та дихромату калію). Вибір найбільш ефективного типу інгібітора та його робочої концентрації для конкретного об'єкта здійснюється виключно експериментальним (дослідним) шляхом.

При застосуванні трехкомпонентного інгібітора дозу біхромату калію слід приймати 2-4 мг/л по CrO_4^{2-} , сульфату цинку - 1,5-3 мг/л по Zn^{2+} і гексаметафосфата або триполіфосфату натрію - 3-5 мг/л по PO_4^{3-} . При цьому необхідно визначати концентрації хрому в водоймі при скиданні продувочної води і в атмосферному повітрі робочої зони при віднесенні вітром крапель води з градирень. Ці концентрації не повинні перевищувати гранично допустимі (ГДК).

Швидкість руху води в системі повинна бути не менше 0,5 м/с.

При використанні силікату натрію дозу рідкого скла в розрахунку на SiO_2 повинна дорівнювати 10 мг/л, при високих концентраціях хлоридів і сульфатів (500 мг / л і більше) дозу необхідно збільшувати до 30-40 мг/л.

1.4 Охолодження оборотної води

Тип і розміри охолоджувача повинні прийматися з урахуванням:

- розрахункових витрат води;

- розрахункової температури охолодженої води, перепаду температур води в системі і вимог технологічного процесу до стійкості охолоджувального ефекту;
- режиму роботи охолоджувача (постійний або періодичний);
- розрахункових метеорологічних параметрів;
- умов розміщення охолоджувача на майданчику підприємства, характеру забудови навколишньої території, допустимого рівня шуму, впливу виносу вітром крапель води з охолоджувачів на навколишнє середовище;
- хімічного складу додаткової і оборотної води і ін.

Технологічні розрахунки градусень і бризкальних басейнів належить проводити виходячи з середньодобових температур атмосферного повітря по сухому і вологому термометрам (або відносної вологості повітря) по вимірах в 7, 13 і 19 годині за літній період року за багаторічними спостереженнями при забезпеченості 1-10%. Для теплових і атомних електростанцій розрахунки слід проводити виходячи з середньодобових температур атмосферного повітря, по сухому і вологому термометрам за літній період середнього і жаркого року.

При відсутності даних про середньодобових температурах і вологості атмосферного повітря з вказаною забезпеченістю слід приймати середні температури і вологості в 13 год. для найбільш жаркого місяця згідно СНиП 2.01.01-82 з додаванням до температури повітря по вологому термометру $1-3^{\circ}\text{C}$ при незмінній величині вологості в залежності від категорії водоспоживачів.

Технологічні розрахунки градусень повинні виконуватися за методикою, яка враховує тепломасообмен в активній зоні охолодження і аеродинамічні опору градусні, або за графіками, складеними на підставі експериментів.

Технологічні розрахунки охолоджувальної здатності бризкальних басейнів і відкритих градусень повинні виконуватися за експериментальними графіками.

Технологічні розрахунки радіаторних градусень повинні виконуватися за методикою, прийнятою для розрахунку теплообмінних апаратів з оребренними трубами, охолоджуваних повітрям.

Технологічні розрахунки водосховищ-охолоджувачів для теплових і атомних електростанцій повинні виконуватися виходячи з середньомісячних

гідрологічних і метеорологічних факторів середнього року з урахуванням теплоаккумулюючої здатності водосховища, графіків навантаження і ремонту устаткування.

Для літнього періоду середнього і жаркого року забезпеченістю 10% перевіряється потужність обладнання, встановлюються межі і тривалість обмеження потужності по максимальним добовим температур охолоджуючої води. При використанні для охолодження води існуючих водойм іншого призначення необхідно враховувати особливості просторового формування температурного режиму в природних умовах і при скиданні підігрітої води. При наявності в оборотній воді домішок, агресивних по відношенню до матеріалів конструкцій градирень і брызкальних басейнів, повинні передбачатися обробка води або захисні покриття конструкцій.

Глибина води в брызкальних басейнах і водозбірних резервуарах градирень повинна прийматися не менше 1,7 м, відстань від рівня води до борта басейну або резервуара - не менше 0,3 м.

Водозбірні резервуари і брызкальні басейни повинні бути обладнані відвідними, спускними і переливними трубопроводами, а також сигналізацією мінімального і максимального рівнів води. На зворотному трубопроводі слід передбачати соровтримуючі ґрати з прозорами не більше 30 мм. Днища водозбірних резервуарів і брызкальних басейнів повинні мати нахил не менше 0,01 в бік приямки зі спускною трубою. Також слід передбачати водонепроникне покриття шириною не менше 2,5 м з нахилом від споруд, що забезпечує відведення води, що виноситься вітром з вхідних вікон градирень і брызкальних басейнів

1.5 Технічні умови будівництва оборотних систем

Зниження енергоємності виробничих процесів та підвищення ефективності використання сировинних ресурсів має реалізуватися у двох напрямках: через модернізацію наявних технологічних схем та основного обладнання, а також шляхом виходу на якісно новий рівень

енергоефективності допоміжних систем, зокрема оборотного водопостачання підприємств.

Від ефективності роботи залежить продуктивність технологічного устаткування, якість і собівартість продукції, питома витрата сировини, палива й електроенергії.

Крім цього, аналіз можливих шляхів енерго і ресурсозбереження без значних капітальних витрат при цьому на водних підприємствах і великих компресорних станціях показав, що практично єдиним резервом оперативного і мало затратного рішення цієї проблеми є реконструкція діючих градирень для охолодження оборотної води конденсаторів парових турбін і градирень, що забезпечують проміжне охолодження стиснутого газу.

Так, зниження температури циркуляційної води на $^{\circ}\text{C}$ на турбоблоці потужністю $N = 310$ Мвт приводить до річної економії умовного палива в середньому на 1980 тон / (рік $\cdot$ град).

Охолодження води заданого об'єму до необхідної температури може бути забезпечене на градирнях різних типів і конструкцій з неоднаковими витратами матеріальних і трудових ресурсів і при неоднаковому впливі на навколишнє середовище.

Тому в кожному конкретному випадку варто робити розрахунки техніко-економічних і еколого-економічних показників можливих варіантів для оцінки і вибору найбільш раціонального.

У той же час, на багатьох підприємствах експлуатуються градирні, побудовані 15-20 років тому і потребуючі реконструкції. Оскільки навантаження на такі градирні в даний час, як правило, відрізняється від проектної, найчастіше досить зробити заміну основних технологічних елементів на окремих секціях.

Це дозволяє істотно знизити кількість споживаної електроенергії і забезпечити необхідні параметри роботи.

Для успішної експлуатації оборотних циклів за умови збереження навколишньої природного середовища, особливу увагу варто приділяти водовловлювальним пристроям градирень, ефективна робота яких істотно

скорочує втрати води. Використання водовловлювачів із профільних ПВХ елементів знижує винесення краплинної вологи до 0,004% від витрати оборотної води при нормі рівної 0,2%.

Зрошувач з гофрованих ПВХ пластин використовується в вентиляторних та баштових градирнях й призначений для охолодження технологічної обігової води.



Рисунок 1.1 Зрошувач з гофрованих ПВХ пластин

Охолодження води реалізується шляхом її диспергування над блоками зрошувача, де вона під дією гравітаційних сил стікає у вигляді плівки по гофрованих листах.

Протиточний рух водяної плівки та повітряного потоку забезпечує високу інтенсивність охолодження. Завдяки геометрії гофрованих листів створюється розвинена поверхня контакту фаз.

Це дозволяє мінімізувати аеродинамічний опір системи та досягти максимального температурного перепаду

У процесі експлуатації даний зрошувач не схильний до біообростання й карбонатних відкладень, допускається застосування забрудненої оборотної води.

Збирання блоків зрошувача просте, зручне і займає мало часу, проводиться на місці монтажу. Зрошувач і водовловлювач являють собою об'ємну ґратчасту структуру, що складається з окремих елементів - призм ґратчастих ПР-50.

Призми вкладаються шарами до необхідної висоти. Зрошувач блоковий відноситься до краплинно-плівкового типу зрошувачів. Об'ємний коефіцієнт

тепломасовідачі зрошувача висотою 1м. При швидкості повітря 2,3м/с і щільності зрошення 10.000 кг/(м²/год) дорівнює 9.710 кг/(м³/год).

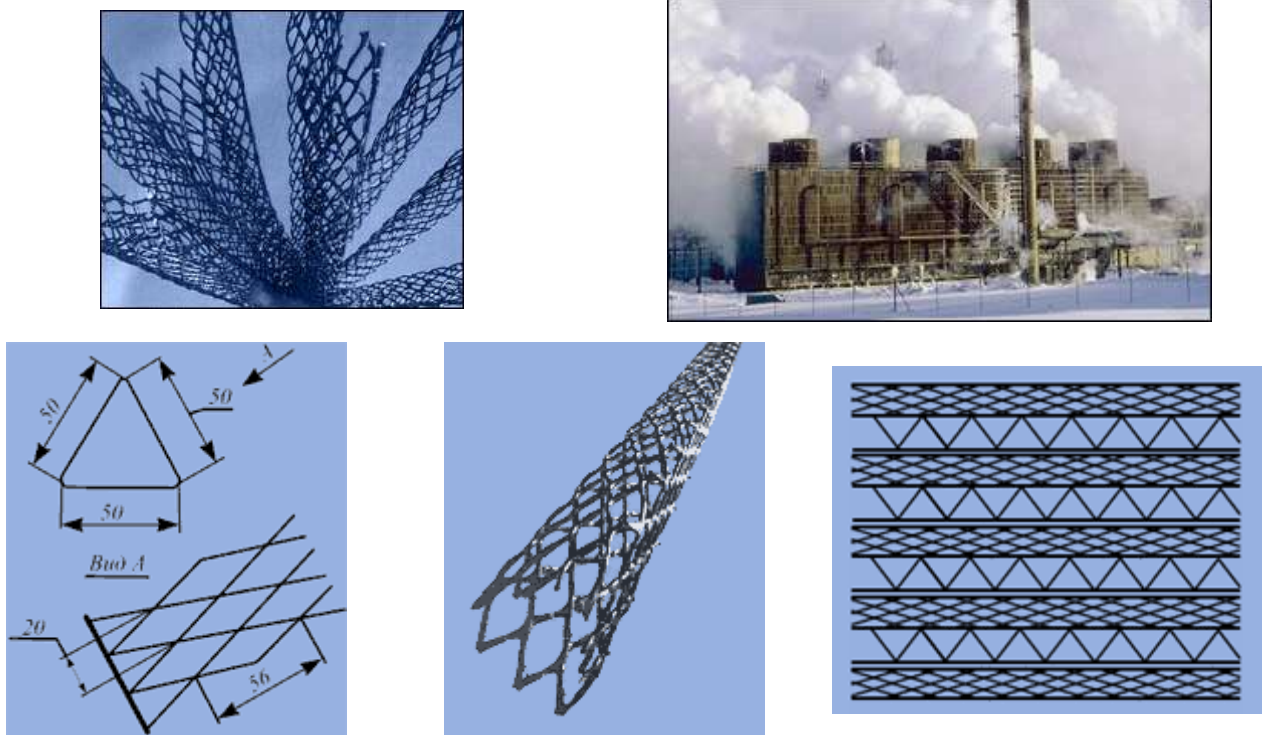


Рисунок 1.2- Гратчаста структура зрошувач з гофрованих ПВХ пластин
Водовловлювач блоковий, висотою 0,2 метри (4 шаруючи призми), забезпечує належне обмеження віднесення краплинної вологи з градирні при швидкості повітря до 2,3м/с.

1.6 Контроль за роботи оборотних систем

Тип градирні з противотоком набагато більш відкритий для удосконалень, чим негнучка конструкція градирні з поперечним потоком.

Треба переконатися, що добре працюють сепаратори крапель. Вони зберігають воду, гарантуючи, що з потоком гарячого повітря, який залишає верхню частину градирні, несесться мало води - це віднесення води також є причиною невдоволення.

Втрати води з тягою призводять до посилення вимог по облаштуваності і втраті хімікатів на обробку води.

Вода зазвичай використовується в охолоджувальних системах з розумінням зручності і завдяки високій теплоємності, нестисливості, точкам кипіння і танення.

Іони, що знаходяться у воді, можуть значно впливати на її поведінку і властивості. Іонообмін з можливою біологічною активністю може викликати багато проблем у роботі градирень, тим самим знижуючи термічні показники градирні й у результаті - збільшуючи поточні витрати станції.

Дуже важливо знати, які є хімічні і біологічні індикатори, щоб можна було налагодити відповідний режим хімічної обробки й у такий спосіб забезпечити ефективну роботу.

На градирні впливає наступне: забруднення тепловіддаючої поверхні з боку води через утворення нальоту; осідання зважених твердих речовин у великих і малих трубах; утворення нальоту через кристалізацію розчинених солей; бактеріальний слиз; корозія тепловіддаючих поверхонь (в основному гальванічна).

Дуже важливо налагодити систему моніторингу, щоб стежити за цими ефектами і робити обробку відповідними інгібіторами. Існують інгібітори від мінеральних відкладень, корозії, органічного обростання та засмічення.

2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

2.1 Системи охолодження конденсаторів водного господарства

Процес термічного зниження температури оборотного потоку базується на його гравітаційному стіканні по гофрованій структурі плівкового зрошувача після попереднього форсуночного диспергування. Висока ефективність охолодження досягається в умовах протитоку рідкої та газової фаз.

Спеціальна геометрія гофрованих листів максимізує питому площу міжфазного контакту, що забезпечує інтенсивний тепломасообмін при мінімальних аеродинамічних втратах напору вентилятора.

Кожна система замкнута, зворотна з охолодженням води в окремому бризгальному басейні (розміром 60x80м) та витратами: у нормальному режимі 1620 м³/год., у аварійному режимі – 3730 м³/год;

Технічне водопостачання невідповідальних споживачів води складається із замкнутої системи, зворотної, з охолодженням води на одному бризгальному басейні.

Система охолодження конденсаторів турбін енергоблоку потужністю 440 МВт замкнута, зворотна, двопідйомна з охолодженням води у баштових градирнях.

Система складається із наступних споруд та обладнання:

1 блочна насосна станція (БНС) обладнана циркуляційними насосами типу ОПВ 6 – 145Е (8шт.), які подають воду в конденсатори для процесу теплообміну:

Для запобігання засміченню трубок конденсаторів перед циркуляційними насосами встановлені обертові сітки типу ТМ розмірами комірки 5x5 мм. У разі необхідності припускається можливість зупинки циркуляційного насосу в нічний час на термін до 5 год.;

2 напірний водогін діаметром 2040 мм для транспортування охолоджуючої води від циркуляційного насосу до конденсатора;

3 двоохходовий конденсатор типу К – 12150:

–	поверхня охолодження, м ²	12150
–	тиск пари, що конденсується, кгс/см ²	0,052
–	кількість пари, що конденсується, т/год	382,5
–	гідравлічний опір по воді, м	4
–	кількість ходів води	2
–	швидкість охолоджуючої води в трубках конденсатора, м/с	1,8
–	зовнішній діаметр трубок, мм	28
–	внутрішній діаметр трубок, мм	26
–	активна довжина трубок, м	8,89
–	матеріал трубок	МНЖ-5-1
–	кількість трубок, шт	15866

Витрата охолоджуючої води на один конденсатор турбіни К – 220 – 44 складає 25245 м³/год.;

4 зливний водогін діаметром 2040мм та закритий залізобетонний канал перерізом 4200х3000 мм. для відведення охолоджуючої води з конденсатора у відкритий відвідний канал і далі у водоприймальник насосної станції градирень (НСГ);

5 насосна станція градирень (НСГ) другого підйому (4 насоси ОПВ – 10 – 185 ЕГ) для подавання води на градирні;

6 баштова градирня висотою 150 м з площею зрошення 10000 м² для охолодження води нагрітої у конденсаторах турбін.

7 3 ковша градирні охолоджуюча вода через зливні залізобетонні канали (дві нитки перерізом 7800 х 4000 мм) повертається у приймальний ківш БНС.

Для отримання потрібної температури відпрацьовану воду перед новим її використанням охолоджують у спеціальних спорудах – баштових градирнях.

У склад технологічних розрахунків градирні входить визначення розрахункових метеорологічних параметрів, теплотехнічний і аеродинамічний розрахунки.

2.2 Визначення розрахункових метеорологічних параметрів

До цих параметрів відносяться: температура повітря по сухому і вологому термометру, відносна вологість і щільність повітря визначаються за даними метеорологічних досліджень за багаторічний період (не менше ніж за 10 років) відповідно до необхідного ступеня забезпеченості температури охолодженої води.

У якості розрахункової найчастіше приймається температура повітря по вологому термометру, яка перевищується не більше п'яти днів за рік.

У місці розташування градирень склався свій стійкий мікроклімат, який характеризується підвищеною температурою по вологому термометру.

За даними: температура повітря по сухому термометру $\Theta = 24,9^{\circ}\text{C}$; температура повітря по змоченому термометру $\tau = 17,7^{\circ}\text{C}$; відносна вологість $\phi = 54\%$; щільність повітря $\rho_{\text{п}} = 1,156 \text{ кг/м}^3$.

2.3 Теплотехнічний розрахунок градирні

Задачею теплового розрахунку є знаходження кількості градирень, які забезпечували б потрібне охолодження заданої кількості води.

Розрахунок градирні ведеться за методом викладеним у Меркеля.

Визначається кількість градирень при слідуючи розрахункових умовах:

- гідравлічне навантаження градирні $G_{\text{в}} = 27101 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$;
- температура води на вході до градирні $t_1 = 37,0^{\circ}\text{C}$;
- температура води на виході з градирні $t_2 = 28,4^{\circ}\text{C}$;
- барометричний тиск $P_{\text{б}} = 99,9 \text{ кПа}$;
- площа зрошення однієї градирні $f_{\text{зр}} = 9400 \text{ м}^2$;
- висота зрошувача $h = 2,5 \text{ м}$;
- зрошувач плівкового типу

– коефіцієнти: $A = 0,36\text{м}^{-1}$, $m = 0,72$, $K_{зр} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 3600\text{м} \cdot \text{с} / \text{кг}$;

$$\xi_{\text{сухзр}} = 1,25,$$

– $\xi_{\text{водовл}} = 4,2$;

– середнє значення температури води, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{37,0 + 28,4}{2} = 32,7^{\circ}\text{C}$$

– питома теплоємність води $C_{\text{в}} = 4187 \text{Дж} / \text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$;

– щільність повітря на виході з градирні $\rho_{\text{п}_2} = 1,065 \text{кг} / \text{м}^3$.

Ентальпія насиченого повітря біля поверхні води:

– на вході до градирні $i_1'' = 150 \text{кДж} / \text{кг}$;

– на виході з градирні $i_2'' = 9 \text{кДж} / \text{кг}$.

Ентальпія насиченого повітря біля поверхні води при середній температурі води: $i_m'' = 127 \text{кДж} / \text{кг}$.

Ентальпія повітря у потоці на вході до градирні: $i_1 = 54 \text{кДж} / \text{кг}$.

$$\delta_i'' = \frac{i_1'' + i_2'' - 2 \cdot i_m''}{4} = \frac{150 + 9 - 2 \cdot 127}{4} = -1,25 \text{кДж} / \text{кг}$$

Для розрахунку градирні за методом Маркеля визначаються відносні величини y , x , U , та R .

$$\delta_i'' = \frac{i_1'' - i_1 - \delta_i''}{i_2'' - i_1 - \delta_i''} = \frac{150 - 54 - (-1,25)}{99 - 54 - (-1,25)} = 2,1$$

$$x = \frac{U}{\lambda}$$

$$U = \frac{(t_1 - t_2) \cdot C_{\text{в}}}{k \cdot (i_2'' - i_1 - \delta_i'')} = \frac{(37,0 - 28,4) \cdot 4,187}{0,95 \cdot (99 - 54 - (-1,25) \cdot 10^3)} = 0,82$$

$$R = \frac{U^{1-m}}{A \cdot h} = \frac{0,82^{1-0,72}}{0,36 \cdot 2,5} = 1,051$$

де λ - величина питомої витрати повітря, $\text{кг} / \text{кг}$;

k – поправочний коефіцієнт у спрощеному рівнянні теплового балансу.

$$k = 1 - \frac{C_{\text{в}} \cdot t_2}{r} = 1 - \frac{4187 \cdot 28,4}{2260 \cdot 10^3} = 0,95$$

де r – питома теплота випаровування, $\text{Дж} / \text{кг}$.

За графіком [40–46] у залежності від $m = 0,72$, $y = 2,10$ та $R = 1,051$ визначається x , $x = 1,02$.

Згідно:

$$\lambda = \frac{G_{\Pi}}{G_B}, \text{ кг / кг}$$

де G_{Π} – масова витрата повітря, кг/с:

$$G_{\Pi} = Q_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi} = 20680 \cdot 1,156 = 23906,1 \text{ кг / с}$$

де Q_{Π} – об’ємна витрата повітря через градирню, $\text{м}^3/\text{с}$.

$$Q_{\Pi} = V_{\text{зр}} \cdot f_{\text{зр}} = 2,2 \cdot 9400 = 20680 \text{ м}^3 / \text{с}$$

де $V_{\text{зр}} = 2,2 \text{ м/с}$ – швидкість руху повітря у зрошувачі, м/с .

$$\lambda = \frac{23906,1}{27101,0} = 0,88 \text{ кг / кг}$$

Згідно

$$a_6 = (k_{\text{зр}} \cdot h + 0,0002) \cdot 3600 = (0,0001 \cdot 2,5 + 0,0002) \cdot 3600 = 1,62 \text{ м}^2 \cdot \text{с / кг}$$

$$B_6 = \xi_{\text{гр.безоб.}} + \xi_{\text{сухзр}} \cdot h + \xi_{\text{водовл.}}$$

де $\xi_{\text{гр.безоб.}}$ - коефіцієнт аеродинамічного опору градирні без зрошувача та іншого технологічного обладнання визначається в залежності від співвідношення $\frac{f_{\text{вік}}}{f_{\text{зр}}}$:

де $f_{\text{вік}}$ – площа повітровхідних вікон, м^2 .

$$\text{При } \frac{f_{\text{вік}}}{f_{\text{зр}}} = \frac{3450}{9400} = 0,37 \quad \xi_{\text{гр.безоб.}} = 21,6$$

$$B_6 = 21,6 + 1,25 \cdot 2,5 + 4,2 = 28,93$$

Коефіцієнт d_6 :

$$d_6 = \frac{H \cdot g}{\lambda^2} \left[\left(\frac{S_1 - \lg i_1 + 3,62}{\delta_1} \right)^2 - \left(\frac{S_2 - \lg i_2 + 3,62}{\delta_2} \right)^2 \right]$$

де H – висота градирні від верха вхідних вікон, м ;

S_1, δ_1 - постійні коефіцієнти, що визначаються у залежності від вологості повітря на вході до градирні $\phi_1 = 54\%$.

Приймається відносна вологість повітря на виході з градирні $\phi_1 = 100\%$.

Тоді, коефіцієнти S_2, δ_2 відповідно приймають значення $S_2 = 6,66$, $\delta_2 = 4,69$.

i_2 – ентальпія повітря, що виходить із градирні, кДж/кг [8, ф. 169].

$$i_2 = i_1 + \frac{\Delta t \cdot C_v}{k \cdot \lambda} = 54 + \frac{8,6 \cdot 4,187}{0,95 \cdot 0,88} = 97,1 \text{ кДж / кг}$$

Температура повітря при виході з градирні, $\Theta_2 = 29,5^\circ \text{C}$

$$d_6 = \frac{140 \cdot 9,81}{0,88^2} \left[\left(\frac{6694 - \lg 54 + 3,62}{4,828} \right)^2 - \left(\frac{6,66 - \lg 97,1 + 3,62}{4,690} \right)^2 \right] = 303,21$$

Кількість теплоти, що втрачається водою при охолодженні у градирні, кДж/с.

$$C = C_v \cdot G_v \cdot (t_1 - t_2) = 4,187 \cdot 27101 \cdot (37,0 - 28,4) = 975858,3 \text{ кДж / с}$$

Щільність зрошення $q_{зр}$, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$, визначається з основного розрахункового рівняння для баштових градирень:

$$a_6 \cdot q_{зр}^3 + b_6 \cdot q_{зр}^3 - d_6 = 0$$

$$1,62 \cdot q_{зр}^3 + 28,93 \cdot q_{зр}^3 - 303,21 = 0$$

Для розв'язування одержаного кубічного рівняння використовується запропонована методика:

$$p_1 = \frac{b_6^3}{27 \cdot a_6^3} + \frac{d_6}{2 \cdot a_6} = \frac{28,93^3}{27 \cdot 1,62^3} + \frac{-303,21}{2 \cdot 1,62} = 117,35 \frac{\text{кг}^3}{\text{м}^4 \cdot \text{с}^3}$$

$$p_1 = \frac{-b_6^2}{9 \cdot a_6^2} = \frac{-28,93^2}{9 \cdot 1,62^2} = -35,43 \frac{\text{кг}^2}{\text{м}^4 \cdot \text{с}^2}$$

$$r = \sqrt{|p_2|} = \sqrt{35,43} = 5,95 \frac{\text{кг}^2}{\text{м}^4 \cdot \text{с}^2}$$

$$\text{Оскільки } D = p_1^2 + p_2^3 = 117,35^2 + (-35,43)^3 = -30704 < 0$$

$$\cos \varphi = \frac{p_1}{r^3} = \frac{117,35}{5,95^3} = 0,556, \quad \varphi = 56,2^\circ$$

$$y = 2 \cdot r \cdot \cos \left(60^\circ - \frac{\varphi}{3} \right) = 2 \cdot 5,95 \cdot \cos \left(60 - \frac{56,2}{3} \right) = 8,95 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

$$q_{зр} = y - \frac{b_6}{3 \cdot a_6} = 8,95 - \frac{28,93}{3 \cdot 1,62} = 2,99 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

Визначається необхідна кількість градирень [8, ф. 174].

$$N = \frac{G_v}{q_{зр} \cdot f_{зр}} = \frac{27101}{2,99 \cdot 9400} = 0,96 \text{ шт}$$

Для охолодження оборотної води у кількості $G_b = 27101 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ до заданої температури $t_2 = 28,4^\circ\text{C}$ необхідна одна баштова градирня прийнятої конструкції.

У розрахунках приймалася четверта частина витрати всієї циркуляційної води.

Таким чином, для охолодження до заданих параметрів загальної кількості оборотної води 4 баштові гіперболічні градирні площею зрошення $f_{\text{зр}} = 9400 \text{ м}^2$, висотою 150 м.

$$G_{\text{в.заг}} = 4 \cdot G_b = 4 \cdot 27101 = 108404 \text{ кг/с}$$

2.4 Аеродинамічний розрахунок градирні

Повний аеродинамічний опір градирні являє собою суму опорів: входу повітря до градирні P_1 , повороту до зрошувача P_2 , раптового звуження на вході повітря до зрошувача P_3 , зрошувача P_4 , раптового розширення на виході повітря із зрошувача P_5 , водовловлювача P_6 , водорозподільника P_7 , виходу повітря з градирні P_8 :

$$P_{\text{а.о}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8, \text{ Па}$$

Значення опорів визначається за формулою:

$$P_i = \xi_i \frac{\gamma \cdot \omega_i^2}{2 \cdot g}, \text{ Па}$$

де ξ_i – коефіцієнт опору елементів градирні; ω_i – швидкість руху повітря в елементах градирні, м/с; γ – питома вага повітря, Н/м³

$$\gamma = \rho_{\text{п}} \cdot g = 1,156 \cdot 9,81 = 11,34 \text{ Н/м}^3$$

Коефіцієнт ξ_1 для визначення опору входу P_1 приймається рівним 0,55.

Коефіцієнт опору повороту потоку до зрошувача ξ_2 приймається рівним 0,50 [8, с.18].

Коефіцієнт опору при раптовому звуженні на вході до зрошувача ξ_3 :

$$\xi_3 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{f_0}{f_{\text{зр}}}\right) = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{2068}{9400}\right) = 0,39$$

Коефіцієнт опору зрошувача:

$$\xi_4 = \xi'_4 \cdot h = (1 + K_{зр} \cdot q_{зр}) \cdot \xi_{сухзр} \cdot h = (1 + 0,36 \cdot 2,99) \cdot 1,25 \cdot 2,5 = 6,49$$

де $\xi_{сухзр}$ – коефіцієнт опору 1 м сухого зрошувача.

Коефіцієнт опору виходу потоку із зрошувача:

$$\xi_5 = \left(1 - \frac{f_0}{f_{зр}}\right)^2 = \left(1 - \frac{2068}{9400}\right)^2 = 0,61$$

Коефіцієнт опору водовловлювача $\xi_6 = 4,2$.

Коефіцієнт опору водорозподільника [8, ф. 24]:

$$\xi_7 = \left[0,5 + 1,3 \cdot \left(1 - \frac{f_{о.л}}{f_{зр}}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{f_0}{f_{зр}}\right)^2 = \left[0,5 + 1,3 \cdot \left(1 - \frac{10454}{9400}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{9400}{10454}\right)^2 = 0,42$$

де $f_{о.л}$ – площа живого перерізу градирні у площині лотків водорозподільника, m^2 ;

$$f_{о.л} = 0,785 \cdot D^2 = 0,785 \cdot 115,4^2 = 10454,0 m^2$$

Коефіцієнт опору ξ_8 [8, ф.25]:

$$\xi_8 = \xi_{8(кол)} \cdot \left(1 - \frac{f_{о.к}}{f_{о.л}}\right) + \xi_{тр} = 0,18 \cdot \left(1 - \frac{3378,14}{10454}\right) + 0,02 = 0,14$$

де $\xi_{8(кол)}$ – коефіцієнт опору колектора башти;

$\xi_{тр}$ – коефіцієнт опору тертя;

$f_{о.к}$ – площа вихідного перерізу градирні, m^2

$$f_{о.л} = 0,785 \cdot D_{ок}^2 = 0,785 \cdot 65,6^2 = 3378,14 m^2$$

$$\xi_{тр} = 0,02 \text{ при } \frac{f_{о.к}}{f_{о.л}} = \frac{3378,14}{10454} = 0,32 \text{ і } \alpha_k = 20^\circ$$

Швидкість руху повітря в елементах градирні:

1 у вхідних вікнах:

$$\omega_1 = \frac{Q_{п}}{f_{вх.в}} = \frac{20680}{3450} = 5,99 \text{ м / с}$$

2 у змішувачі, водорозподільнику:

$$\omega_2 = \frac{Q_{п}}{f_{зр}} = \frac{20680}{9400} = 2,20 \text{ м / с}$$

3 у живому перерізі зрошувача:

$$\omega_3 = \frac{Q_{\pi}}{f_0} = \frac{20680}{2068} = 10,0 \text{ м/с}$$

4 у вихідному перерізі градирні:

$$\omega_3 = \frac{Q_{\pi}}{f_{o,k}} = \frac{20680}{3378,14} = 6,12 \text{ м/с}$$

Опори елементів градирні:

$$P_1 = \xi_1 \cdot \frac{\gamma_1 \cdot \omega_1^2}{2 \cdot g} = 0,55 \cdot \frac{11,34 \cdot 5,99^2}{2 \cdot 9,81} = 11,41 \text{ Па}$$

$$P_2 = \xi_2 \cdot \frac{\gamma_1 \cdot \omega_2^2}{2 \cdot g} = 0,5 \cdot \frac{11,34 \cdot 2,2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,4 \text{ Па}$$

$$P_3 = \xi_3 \cdot \frac{\gamma_1 \cdot \omega_3^2}{2 \cdot g} = 0,39 \cdot \frac{11,34 \cdot 10,0^2}{2 \cdot 9,81} = 22,54 \text{ Па}$$

$$P_4 = \xi_4 \cdot \frac{\gamma_1 \cdot \omega_4^2}{2 \cdot g} = 6,49 \cdot \frac{11,34 \cdot 2,2^2}{2 \cdot 9,81} = 18,15 \text{ Па}$$

$$P_5 = \xi_5 \cdot \frac{\gamma_2 \cdot \omega_5^2}{2 \cdot g} = 6,49 \cdot \frac{10,44 \cdot 10^2}{2 \cdot 9,81} = 32,48 \text{ Па}$$

$$P_6 = \xi_6 \cdot \frac{\gamma_2 \cdot \omega_6^2}{2 \cdot g} = 4,2 \cdot \frac{10,44 \cdot 2,2^2}{2 \cdot 9,81} = 10,83 \text{ Па}$$

$$P_7 = \xi_7 \cdot \frac{\gamma_2 \cdot \omega_7^2}{2 \cdot g} = 0,42 \cdot \frac{10,44 \cdot 2,2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,08 \text{ Па}$$

$$P_8 = \xi_8 \cdot \frac{\gamma_2 \cdot \omega_8^2}{2 \cdot g} = 0,14 \cdot \frac{10,44 \cdot 6,12^2}{2 \cdot 9,81} = 2,79 \text{ Па}$$

Повний аеродинамічний опір градирні:

$$P_{a.o} = 11,41 + 1,4 + 22,54 + 18,15 + 32,48 + 10,83 + 1,08 + 2,72 = 100,68 \text{ Па}$$

Визначається сила тяги градирні, Па [8, ф.36]:

$$P_6 = H \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) = 140 \cdot (11,34 - 10,44) = 126,0 \text{ Па}$$

де γ_1 – питома вага зовнішнього повітря, Н/м³;

γ_2 – питома вага повітря на виході з градирні, Н/м³;

H – висота градирні від верху вхідних вікон, м.

Повний аеродинамічний опір градирні не перевищує силу тяги, тобто буде забезпечуватись нормальна робота градирні.

$$P_6 = 126,0 \text{ Па} > P_{a.o} = 100,68 \text{ Па}$$

2.5 Конденсатори

Пара, яка відпрацювала у турбіні, потрапляє у конденсатор, де вона охолоджується і конденсується у дистильовану воду.

Застосовують двоходові конденсатори типу К –12150. Крім отримання конденсата, призначенням конденсаційної установки є також підтримання вакууму у конденсаторі (94 – 96%). Високий рівень вакууму веде до більш економного витрачання пари і забезпечує нормальну потужність турбіни.

Конденсатори споживають приблизно 90% всієї виробничої води.

Необхідна кількість води:

$$q = d \cdot k, \text{ м}^3 / \text{год},$$

де d – кількість пари, що конденсується, т/год; k – кратність охолодження.

Для забезпечення високого вакууму потрібні достатньо низька температура охолоджуючої води і величина кратності охолодження, що складає звичайно, при зворотній системі: влітку 60...70; взимку 55...60.

$$q = 382,5 \cdot 60 = 25245 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Кратність охолодження і температура води зв'язані залежністю:

$$d \cdot i = q \cdot (t_2^k - t_2^k) = q \cdot \Delta t^k$$

де Δt^k – температурний перепад, ступінь нагріву води у конденсаторі, $^{\circ}\text{C}$;

i – тепловіддача пари при конденсації, ккал/год.

$$\Delta t^k = \frac{d \cdot i}{q} = \frac{382,5 \cdot 540}{25245} = 8,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Витрата пари залежить від типу парових турбін і складає:

- для потужних турбін високого тиску 3,5...4,0 кг/кВт·год;
- невеликих турбін середнього тиску 5,0...6,0 кг/кВт·год.

Вода, яка подається у конденсатор, повинна містити якомога менше абразивних домішок.

Напір води при подачі її у конденсатор складає близько 20 м вод. ст.

В умовах станції напір циркуляційних насосів складає:

- для I – го режиму роботи 4,6 м;
- для II – го режиму роботи 7,5 м.

2.6 Підбір циркуляційних насосів

Циркуляційні насоси призначені для подавання охолоджуючої води у конденсатори турбіни.

Необхідна кількість охолоджуючої води складає $Q_{\text{ох}}^{\text{кон}} = 392700 \text{ м}^3 / \text{год.}$

Приймається 8 робочих насосів марки ОПВ 6 - 145 Э (БНС-1).

Стисла характеристика насоса:

1	Подача, м ³ /год	29800
2	Напір, м	7,5
3	Частота обертання, об/хв.	290
4	ККД, не менше, %	84
5	Допустимий кавітаційний запас, м, для режиму:	
—	номінального	12
—	граничного	14
6	Тип електродвигуна	СДВ 17-39-16У4
7	Потужність, кВт	1600
8	Напруга, В	6000

Для подавання охолоджуючої води у машинне і реакторне відділення енергоблоку призначена БНС – 2, яка обладнана осьовими насосами марки ОПВ 2 - 185 ЄГ у кількості 4 шт.

Стисла характеристика насоса:

1	Подача, м ³ /год	29800
2	Напір, м	7,5
3	Частота обертання, об/хв.	290
4	ККД, не менше, %	84
5	Допустимий кавітаційний запас, м, для режиму:	
—	номінального	12
—	граничного	14
6	Тип електродвигуна	СДВ 17-39-16У4
7	Потужність, кВт	1600
8	Напруга, В	6000

2.7 Розрахунок і підбір насосного обладнання

Насосна станція градирень (НСГ) призначена для подавання підігрітої у конденсаторах турбогенераторів та інших теплообмінників води на градирні для охолодження

Максимальна витрата води, що подається однією НСГ, складає $Q_{\text{НСГ}} = 195128 \text{ м}^3 / \text{год}$.

На кожну градирню вода подається двома водоводами. Із розрахунку, що на кожний водовід працює один насос, приймається загальна кількість робочих насосів – 4 шт, резервних не передбачається.

Подача одного насосу складає:

$$Q_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{НСГ}}}{n} = \frac{195128}{4} = 48782 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Необхідний напір насосу:

$$H_{\text{н}} = H_{\text{Г}} + h_{\text{н.а}} + h_{\text{н.в}} + h_{\text{в.с}} + h_{\text{в}}, \text{ м}$$

де: $H_{\text{Г}}$ – геодезичний напір, м; $h_{\text{н.а}}$ – втрати напору в насосному агрегаті, м; $h_{\text{н.в}}$ – втрати напору у напірному водогоні, м; $h_{\text{в.с}}$ – втрати напору у водорозподільній системі градирні, м; $h_{\text{в}}$ – напір на вилив, м.

$$\text{Приймається } h_{\text{н.а}} + h_{\text{н.в}} + h_{\text{в.с}} + h_{\text{в}} = 3,5 \text{ м}.$$

$$H_{\text{Г}} = \Delta_1 - \Delta_2 = 202,15 - 187,55 = 14,60 \text{ м}$$

де Δ_1 – відмітка вихідного отвору сопла водорозподільної системи градирень, м; Δ_2 – мінімальний рівень води у водоприймальному ковші НСГ, м.

$$H_{\text{н}} = 14,60 + 3,50 = 18,10 \text{ м}$$

За каталогом насосів приймається 4 основних вертикальних насоси з ручним приводом повороту лопатей робочого колеса марки ОПВ-10-185 з такими характеристиками:

1	Подача, $\text{м}^3/\text{год}$	57500
2	Напір, м	18,6
3	Частота обертання, об/хв.	290
4	ККД, не менше, %	86

5	Допустимий кавітаційний запас, м, для режиму:	
–	номінального	13
–	граничного	17
6	Тип електродвигуна	ВДС 2-325/44-20УХЛ4
7	Потужність, кВт	4000
9	Напруга, В	6000

2.8 Розрахунок трубопроводів подачі води

Розрахунок нагрітої води на охолодження у градирні

Діаметр трубопроводів визначається із залежності від витрати води та швидкості її руху. Приймається швидкість руху води у водогонах від НСТГ до градирень $V = 2,5$ м/с.

Діаметр трубопроводів знаходиться за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_n}{\pi \cdot V \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 48}{3,14 \cdot 2,5 \cdot 3600}} = 2,63 \text{ м}$$

Приймаються сталеві труби діаметром $D = 2630 \text{ мм}$ (індивідуальне замовлення).

Втрати напору в трубопроводах:

$$h_{н.в} = h_d + h_m, \text{ м}$$

де h_d – втрати напору по довжині, м; h_m – місцеві втрати напору, м.

$$h_d = K \cdot A \cdot l \cdot Q_n^2 = \frac{Q_n^2}{\left(\frac{K'}{n}\right)^2} \cdot l = \frac{13,55^2}{\left(\frac{4,1}{0,012}\right)^2} \cdot 50 = 0,08 \text{ м}$$

де K' – витратна характеристика при $n = 1$; n – коефіцієнт жорсткості; l – довжина трубопроводу, м.

$$h_m = \sum \xi \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = (4 \cdot 0,22 + 1,5) \cdot \frac{2,5^2}{2 \cdot 9,81} = 0,76 \text{ м}$$

$$h_{н.в} = 0,08 + 0,76 = 0,84 \text{ м}$$

Трубопроводи підживлюючої води

Для заміщення втрат із циркуляційної системи зворотнього водопостачання станції по двох водогонах у систему подається підживлювальна вода загальною витратою 7960 м³/год. Економічно найвигіднішим діаметром напірних водогонів, при якому приведені затрати по комплексу споруд (насосна станція і водогін) мінімальні, прийнятий $d_{ек} = 900$ мм.

Швидкість руху води у водогоні:

$$V_{жив} = \frac{Q_{жив}}{0,785 \cdot n \cdot d_{ек} \cdot 3600} = \frac{7960}{0,785 \cdot 2 \cdot 0,9^2 \cdot 3600} = 1,74 \text{ м/с}$$

де n – кількість ниток водогону.

Трубопроводи подачі охолоджуючої води на конденсатори

Охолоджуюча вода подається на конденсатори блочною насосною станцією по циркуляційних водогонах.

Витрата води, що подається по одному водогону складає:

$$Q_1 = \frac{Q_{ох}^{кон}}{3600 \cdot n} = \frac{200000}{3600 \cdot 8} = 6,95 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Діаметр циркуляційних водогонів приймається рівним $D_{ох}^{кон} = 2000$ мм .

Швидкість руху води у трубопроводах:

$$V_{ох}^{кон} = \frac{Q_1}{0,785 \cdot (D_{ох}^{кон})^2} = \frac{6,95}{0,785 \cdot 2^2} = 2,21 \text{ м/с}$$

2.9 Режим охолоджуючої води в оборотних системах водопостачання

Гідрохімічний режим циркуляційної води в оборотних системах кардинально відрізняється від прямоточного водопостачання. Оскільки вода піддається багаторазовому циклічному нагріванню та охолодженню, в системі відбуваються постійні втрати чистого контенту через випаровування та крапельний винос. Разом із плановою продувкою контуру це призводить до безперервного концентрування розчинених солей та глибокої зміни початкового хімічного складу води

У вихідних даних при проектуванні оборотних систем, вказуються втрати води у кількісному та процентному відношеннях на випаровування, винос вітром, продувку.

Втрати води на продувку визначаються в залежності від якості оборотної води та води, що додається, а також від способу її обробки. При цьому, у втрати на продувку слід включати, якщо це потрібно, додаткові витрати води на виробничі потреби.

Необхідність обробки води визначається розрахунком, окремо для літнього та зимового режимів роботи системи оборотного водопостачання, при співвідношенні

$$L_{\text{дод}} \cdot K_v > 3$$

де $L_{\text{дод}}$ – лужність води, що додається, мг·екв/л;

K_v – коефіцієнт випаровування, який визначається так

$$K_v = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3},$$

де P_1 , P_2 , P_3 – втрати води відповідно до випаровування, винос вітром та продувку, %.

Лужність оборотної води визначається за формулою:

$$L_{\text{зв}} = 0,22N^2(P - P_1) + 0,1N\sqrt{4,84N^2(P - P_2)^2 + (100 - P)\text{CO}_2^{\text{охол}} + p\text{CO}_2^{\text{дод}} + 44L_{\text{дод}}},$$

де $P_1+P_2+P_3$ – втрати води у системі, %.

$$N = \frac{\varphi}{K_2\text{Ca}^{\text{дод}}},$$

де φ – коефіцієнт, який залежить від загального солемісту у оборотній воді та її температури після охолодження; відповідно кількість у воді, що додається кальція, вуглекислоти, мг/кг, а також її лужність, мг·екв/л; концентрація CO_2 у оборотній воді після охолоджувача, мг/л; $S_{\text{дод}}$ – солеміст води, що додається.

Необхідно зауважити, що хімія води у оборотних системах ще недостатньо вивчена. Практично в даний час суто емпірично підходять до розв'язування конкретних задач організації водно-хімічних режимів у оборотних системах.

Багато спеціалістів впевнені, що володіють певними теоретичними обґрунтуваннями цих складних процесів. Але це не так, оскільки наші знання у цій області – це вибір практичних рецептів і деяких уявлень, запозичених із фізичної хімії.

Відсутність достатніх знань стосовно процесів у оборотних системах на практиці призводить до явища накипоутворення.

Причиною утворення накипу є порушення вуглекислотної рівноваги, що обумовлюється нагріванням води та втратою вільної вуглекислоти.

Одним із методів запобігання утворенню накипу у оборотних системах є продувка води із циркуляційної системи охолодження. Витрати води на продувку визначаються за умов, що збільшення твердості води, що відбувається за умов випаровування частини води, не повинно перевищувати певних меж. При продувці разом із водою вилучається частина солей твердості. З підвищенням твердості у системі збільшується кількість солей, що вилучається до тих пір, поки не встановиться рівновага між кількістю солей, що поступають із водою, яка додається у систему і кількістю солей у системі.

Продувка використовується у тому випадку, коли твердість води, що додається, менше допустимої твердості оборотної води; у більшості випадків однієї продувки системи недостатньо. Для запобігання утворення накипу необхідна або відповідна хімічна обробка, або один із безреагентних методів обробки води (ультразвуковий, магнітна обробка).

2. 10 Принцип роботи пристроїв МПВ MWS

Під час магнітної обробки у пристрої серії MWS на молекули води та розчинені домішки діє зовнішнє магнітне поле. Це призводить до руйнування або перебудови макромолекулярних кластерів води (водневих зв'язків). Унаслідок деструкції кластерної структури гідратовані іони домішок вивільняються з водних асоціатів, що інтенсифікує їхню взаємну дифузію та контакт. Як наслідок, безпосередньо в об'ємі холодної води іони кальцію та карбонат-іони починають осаджуватися на дисперсних мікрочастинках, які

виконують роль готових центрів кристалізації. Це зумовлює формування зважених мікрокристалів (шламу) замість утворення накипу на стінках обладнання.

Процес цей лавиноподібний - нові іони кальцію прикріплюються до вже висаджувачого кальцію на поверхні мікрокристалів. Таким чином, іони кальцію, вже висадилися на центрах кристалізації, не випадають у вигляді накипу на нагрівальних поверхнях. Мікрокристали залишаються в товщі води і виносяться в дренаж. Більш того - іони кальцію із уже випавшого накипу починають відриватися і приєднуються до новостворених мікрокристалам. З часом стара накип розпушується і повністю вимивається з поверхні труб і нагрівальних елементів. Якщо ж пристрій МПВ MWS встановлюється на нове обладнання або на обладнання після очищення, то накип не випадає. Крім того, з плином часу на поверхні труб утворюється тонка оксидна плівка, що захищає обладнання від корозії.

Вода, оброблена пристроєм МПВ MWS, зберігає свої властивості протягом деякого часу - від 10 годин до 8 діб, в залежності від складу води і умов експлуатації. Як правило, цього часу цілком достатньо для отримання успішних результатів.

Будь-яка система водопостачання є частиною навколишнього середовища. Вуглекислий газ і кисень надходять в воду з атмосфери. Вуглекислий газ може вступати у взаємодію з водою і утворювати вугільну кислоту. У місцях з густим рослинним покривом спостерігається активне споживання кисню входить до складу води. Гниття і розпад рослин призводять до утворення вуглекислих газів. У тих районах, де переважають вапнякові ґрунти, вода, що містить вугільну кислоту, вступає у взаємодію з вапняком і стає жорсткою.

Жорстка вода зустрічається настільки часто, що люди, кажучи іноді про забруднення води, мають на увазі тільки одну цю проблему. Невидимі погляду мінеральні речовини можуть робити воду настільки жорсткою, що її використання стає, деколи, просто неможливим.

Накип є однією з найсерйозніших проблем, причиною якої є жорстка вода і містяться в ній мінерали. Цей побічний продукт виводить з ладу багато приладів. Накип утворюється в трубах гарячої води і створює в них пробки, серйозно зменшує ефективність роботи бойлерів і нагрівачів води. Накип формується при нагріванні жорсткої води.

Це відбувається з наступних причин: розкладаються бікарбонати кальцію і магнію; ці ж бікарбонати перетворюються в карбонати з високим ступенем нерозчинності; бікарбонати утворюють осад у воді; концентрація бікарбонатів на внутрішніх поверхнях водонагрівальних приладів.

При деяких умовах осади створюють шлам. І шлам, і накип приводять до значного зниження ефективності водонагрівальних приладів. Крім того, поверхні труб і водообладнання піддаються точкової корозії.

Магнітна обробка води як найбільш перспективний метод безреагентної водопідготовки.

Магнітний спосіб обробки води є з усіх відомих на сьогодні способів очищення і захист від накипу і корозії (хімічних і фізичних) із застосуванням електромагнітних апаратів, що найбільш перспективним.

Спосіб цей не вимагає значних споруд, будь-яких реагентів і спеціальних лабораторій, простий в експлуатації і досить оперативний. Застосування електромагнітних апаратів в малої та великої теплоенергетиці грає велику роль для вирішення однієї з актуальних проблем - економії палива, збереження і продовження терміну служби теплоенергетичного обладнання, мереж і захисту навколишнього середовища від скидання відпрацьованих реагентів.

2.11 Вплив магнітного поля на властивості води і її домішок

При накладенні магнітного поля концентрація розчинених солей у воді не змінюється, але солі жорсткості виділяються замість накипу в іншому фізичному стані - у вигляді тонкодисперсного шламу, своєчасне видалення якого може забезпечити чистоту поверхні нагрівання та охолодження.

Застосування магнітного поля не слід зводити тільки до дії власного поля; мабуть, весь процес правильно розглядати як комплекс впливають один на одного факторів. Доведено, що у всіх випадках магнітне поле надає певний вплив на кінетику кристалізації, обумовлюючи утворення центрів кристалізації в масі води, внаслідок чого виділення накіпоутворюючів відбувається не на теплопередавальній поверхні нагрівання та охолодження, а в об'ємі води з виділенням замість твердої накипу рухомого тонкодисперсного шламу. Вже одне це підтверджує доцільність застосування магнітного поля в теплоенергетиці. Є дані, що магнітне поле стимулює і процеси коагуляції.

Для прояву ефекту водообробки необхідною умовою, крім дії магнітного поля, є переміщення потоку рідини перпендикулярно магнітному полю. Ефект буде стабільним, якщо магнітне поле впливає багато разів і протягом значного часу (цьому відповідає протяжність робочого зазору (камери) електромагнітного апарату; в апаратах УМО - з 4-ма робочими камерами, не рахуючи камери деаерації, їх сумарна довжина досягає 3-х метрів). Поряд з протинакипним ефектом при обробці води магнітним полем спостерігається паралельно протікаючий процес відставання накипу, що утворився до застосування магнітного поля або в процесі обробки. Таким чином, магнітне поле обумовлює два процеси, що призводить до очищення обладнання від накипу. Вода зберігає набуті властивості після накладення поля протягом 8-10 годин, а в деяких випадках і більше, але з поступовою втратою цих властивостей. Роботами МЕІ встановлено, що ефект впливу магнітного поля на запобігання накипу визначається в основному термодинамічної нерівномірністю по солям жорсткості, тобто пересиченням її накіпоутворювачем (CaCO_3 і CaSO_4) на момент впливу магнітного поля.

Цьому сприяє і наявність феромагнітних оксидів заліза, що обумовлюють утворення центрів кристалізації. Це як один з можливих варіантів, в основу трактування механізму впливу магнітного поля на воду в теплоенергетиці. Магнітне поле має здатність перебудовувати структуру води, що обумовлено розчиненням у воді киснем. Під впливом магнітного поля змінюється діелектрична проникність і магнітна сприйнятливості розчину.

При протіканні розчину електроліту в поперечному магнітному полі в результаті переміщення іонів під дією сил (Лоренца) в розчині виникає ЕРС, яка діє в напрямку, перпендикулярному магнітному полю. Таким чином, магнітний апарат, приєднаний до теплоагрегату, є генератором ЕРС, активізуючи окислювально-відновні процеси на межі метал-розчин.

Проведені дослідження показали, що розчин, оброблений в магнітному полі, при певній напруженості стає менш коррозійноактивним, ніж необроблений. Придбані розчином антикорозійні властивості зберігаються більше доби з поступовим зниженням ефекту, який через 2-4 години становить 40-50% початкового. Аналіз проб на розчинений в них кисень показав, що концентрація газу при заданих напруженостях магнітного поля знижується; найбільше зниження концентрації кисню (4,6 - 8,6%) спостерігається при параметрах магнітного поля $1,36 \cdot 10^4$; $- 4 \cdot 10^4$ А/м (170-500 Е). Це відповідає також області найбільшого захисного ефекту.

Теорія захисної дії магнітного поля від корозії поки нерозроблена, однак, є підстави вважати, що явище це пов'язано не зі збільшенням значення рН, а зі зменшенням концентрації розчиненого у воді кисню. Останній під дією магнітного поля може активуватися і утворювати з залізом феромагнітні оксиди, що оберігають поверхню металу від корозії. Процес цей пов'язаний зі зменшенням концентрації кисню, що було встановлено дослідженнями.

Утворення магнетитової плівки

Процес утворення захисної магнетитової плівки в апаратах для обробки води магнітним полем протікає в такий спосіб.

Одним з продуктів корозії стали є гідроокис заліза $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, яка в результаті дегідратації може переходити в магнетит Fe_3O_4 . За відсутності магнітного поля шар $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ постійно розмивається потоком води. Якщо ж метал знаходиться в сфері впливу магнітного поля, то $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ притягується до поверхні металу і утворює ізолюючий шар, що перешкоджає проникненню кисню в більш глибокі шари, завдяки чому утворюється магнетит.

Зниження корозії металу в водних розчинах під впливом магнітного поля може бути особливо ефективним для таких агрегатів, де можливий безперервний вплив магнітного поля на воду.

При використанні в системах охолодження конденсату або дисцилята для запобігання корозії зазвичай застосовують пасиватор - їдкий Na, тринатріфосфат, нітрит натрію і ін., Які поряд з позитивною дією можуть впливати і негативно, роз'їдаючи сплави, прокладки, рукава. Крім того, їх застосування вимагає організації спеціального господарства та контролю, що здорожчує виробництво і збільшує обсяг ремонтних робіт. Магнітний спосіб не має зазначених недоліків.

2.12 Магнітне поле і кристалізація

Кристалізація може відбуватися значно швидше і легше, якщо в розчині вже існує тверда поверхня. Прикладом впливу готової поверхні на кристалізацію може служити той факт, що зародки кристалізації (і накип) зазвичай утворюються на поверхні нагрівання або охолодження теплоагрегату, тому що енергія, що витрачається на їх утворення на твердій стінці, буде значно менше енергії, необхідної для утворення в об'ємі води. При цьому на утворення зародка і кристалізацію впливатимуть також електричне взаємодія і характер поверхні: наявність шорсткості, тріщини, тобто чинники, що збільшують площу поверхні, в присутності яких величина роботи утворення зародка може бути настільки зменшена, що виділення твердої фази в відомих умовах може статися навіть з неперенасиченого розчину.

Магнітне поле обумовлює утворення кристалічних мікрозародишів накіпоутворювачів у водних розчинах за умови, якщо ці розчини під час поступання до магнітного апарату знаходяться в перенасиченому стані. В подальшому при нагріванні зародки перетворюються в кристалічні центри. Їх кількість значно більша, а розмір менше, ніж при відсутності попередньої обробки води магнітним полем. Крім того, скорочується латентний період кристалізації, тобто тверда фаза виділяється раніше.

Велике значення має індукований електричний струм, що виникає при накладенні магнітного поля; при цьому порушуються умови гідратації іонів і створюються сприятливі умови для їх зближення і утворення кристалічних центрів.

В останні роки розроблена теорія, яка розглядає вплив магнітного поля на потік води з точки зору магнітогідродинамічних процесів. За цією теорією при проходженні води через магнітне поле під дією швидкісного напору і електромагнітних сил виникає ряд поперечних і поздовжніх ефектів (у тому числі найбільше значення має ефект Холла), пов'язаних з перенесенням маси і заряду, що мають наслідком просторово-локалізоване згущення розчиненої речовини. При цьому в шарі рідини, що безпосередньо прилягає до стінки нагрітої труби, по якій рухається потік, утворюються мікрозародиші (навіть при незначному пересиченні за рахунок поверхні стінки), які перетворюються в подальшому в центри кристалізації.

Важлива роль заліза, присутнього в воді в колоїдному стані, як збудника кристалізації. Під дією магнітного поля стійкість золю заліза порушується, і утворюються частинки, які швидше коагулюють, укрупнюються і адсорбують накипоутворювачі. При цьому виходять більш рихлі осади, ніж за відсутності впливу магнітного поля на воду. Крім того, в результаті старіння колоїду його ядро може розпадатися з утворенням феромагнітних частинок, позитивно впливають на протинакипний ефект.

Дослідження показали, що в процесі утворення центрів кристалізації в магнітному полі основна роль належить тільки феромагнітним окислам Fe_3O_4 , Fe_2O_3 . Разом з тим відрізняються і інші функції феромагнетиків: можливість механічного впливу коагульованих агрегатів на випадання твердої фази з пересиченому розчині; утворення адсорбційного ізолюючого шару на поверхні нагрівання, що знижує адгезію накипоутворювачів. Феромагнітні оксиди заліза, що входять до складу кристалічних частинок можуть проявляти стрикційний ефект, що приводить до дроблення зародка, в результаті якого збільшується кількість центрів кристалізації і відповідно зростає протинакипний ефект.

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Магнітна обробка води

Магнітна обробка води здійснюється постійним магнітом, що розщеплює атоми солей жорсткості (жорсткість води до $25^{\circ}\text{F} = 0,5\text{мг/л}$) не даючи їм осідати на поверхню нагрівання, тим самим будучи протинакипним пристроєм.

Магнітну обробку води слід застосовувати при дотриманні наступних умов: підігрів води - не вище 95°C ; карбонатна жорсткість вихідної води - не більше 9мг-екв/л ; вміст заліза - не більше $0,3\text{ мг-екв/л}$;

Коли диполі води проходять через магнітне поле пристрою МПВ MWS, на них діє так звана сила Лоренца

$$F_{\text{Лоренца}} = \pm Q (V \times B),$$

де Q - заряд іонів, V – швидкість потоку, B – магнітна індукція

Під час руху рідини через пристрій магнітної обробки типу MWS водний потік перетинає силові лінії магнітного поля, сформованого постійними магнітами. Внаслідок дії сили Лоренца на гідратовані йони та диполі води ініціюються їхні високочастотні коливання. Просторова конфігурація та просторова періодичність розміщення магнітів підібрані так, щоб забезпечити ефект резонансу молекулярних диполів. Цей резонансний стан призводить до деструкції гідратних оболонок і руйнування зв'язків між молекулами води та дисперсними мікрровключеннями.

У пристроях МПВ MWS застосовуються дуже потужні постійні магніти на основі рідкоземельних металів. Внаслідок цього на молекули води діє велика сила Лоренца в порівнянні з пристроями на магнітах з фериту барію, керамічних магнітах або електромагнітах.

Природна вода, як відомо, являє собою складну багатокомпонентну динамічну систему, до складу якої входять різні солі, органічні речовини (фульвокислоти, гумати), гази, дисперговані домішки і зважені речовини (глинисті, піщані, гіпсові і вапняні частки), гідробіоти (планктон, бентос,

нейстон), бактерії, віруси. У розчиненому стані в воді знаходяться мінеральні солі, які збагачують воду іонами, їх джерелами є природні поклади вапняків, гіпсів і доломіту.

Жорсткість води обумовлена наявністю в ній солей кальцію і магнію, які надходять в підземну воду з омиваються нею ґрунтів. Просочування води через ґрунт призводить до зміни її сольового складу. Значна кількість магнію також погіршує органолептичні властивості води.

Якщо у воді присутні дисоціюючі солі (реальна вода), при магнітній обробці відбувається кілька процесів: зміщення електромагнітними силами полів рівноваги між структурними компонентами води; фізико-хімічний механізм збільшення центрів кристалізації в об'ємі рідини після її магнітної обробки, а також зміна швидкості коагуляції (злипання і укрупнення) дисперсних частинок в потоці рідини. У воді після магнітної обробки збільшується концентрація розчиненого кисню.

Магнітна обробка води здійснюється за допомогою апаратів, що складаються з декількох пар постійних магнітів або електромагнітів, між полюсами яких протікають водні системи.

Ефективність магнітної обробки залежить головним чином від напруженості і градієнта напруженості магнітного поля, швидкості течії, складу рідкої фази водної системи. Зміна властивостей в результаті магнітної обробки води, викликане впливом магнітних полів на домішки, що містяться в водній системі.

Цей вид активації води при впливі магнітним полем дозволяє в багатьох випадках без хімічної обробки води запобігти або значно знизити накипоутворення в теплоенергетичному обладнанні.

Говорячи про накип на теплоенергетичному обладнанні, необхідно сказати, що 1 мм її викликає перевитрата палива на 6%.

При наявності накипу перегріваються поверхні нагрівання обладнання, що може привести до аварійної ситуації з котлами і т.д.

Таким чином, основною областю застосування магнітної обробки води є теплоенергетичне обладнання.

3.2 Вибір і обґрунтування місця встановлення магнітного апарату

Магнітний апарат АМА-25000 призначений для дослідження технології протинакипної магнітної активації (ПМА) охолоджуючої води у системі циркуляційного водопостачання конденсаторів турбін Рівненської АЕС.

Вибрано два конденсатори однієї турбіни, що знаходяться в однакових умовах. Один використовується як дослідний, другий – як контрольний для порівняння.

При виборі місця встановлення апарату враховувалися вимоги: умов технології (необхідні швидкості і гідродинамічний режим); умов ефективності ПМА – апарат повинен забезпечити обробку всього потоку охолоджуючої води і бути розташований не далі 15-20 м від конденсатора; умов надійної експлуатації – необхідна окрема залізобетонна камера, вільний доступ до огляду, розміщення КВП обладнання, проведення ремонтних робіт; мінімальні об'єми будівельно-монтажних робіт для будівництва будівлі під АМА-25000.

При виборі місця встановлення апарату враховувалися також умови експлуатації конденсаторів турбін ТГ-6.

Враховуючи все це, а також розташування трансформаторів, ЛЕП, комунікацій, автодоріг та інших споруд, під магнітний апарат вибраний майданчик, розташований на пристанційному вузлі між основним корпусом і шляхами переміщення трансформаторів (див. лист 1), а магнітний апарат встановлюється на прямолінійній ділянці напірного трубопроводу конденсатора К-7А ТГ-6.

3.3 Розрахунки та конструювання магнітного апарату

На основі проведеного аналізу існуючих магнітних апаратів розроблений апарат магнітної активації АМА-25000 (УПВГ) для систем технічного водопостачання конденсаторів турбін потужністю 220 тис. кВт. Конструкція апарату прямоточна, уніполярна, одно контурна, реалізує пошаровий принцип

обробки, враховує сучасні тенденції в області ПМА великих витрат води. У якості джерела магнітного поля використовуються постійні магніти.

Позитивною особливістю АМА-25000 є висока питома поверхня змочування у робочому каналі, завдяки чому досягається необхідний гідравлічний режим процесу ПМА.

Враховуючи переваги для здійснення пошарової обробки у процесі ПМА, у якості джерела магнітного поля приймаються постійні магніти. У наш час у якості матеріалу для виготовлення постійних магнітів застосовується: леговані сталі, сталі з великим вмістом вуглецю, литі сплави на основі системи Fe-Ni-Al, ферит барію.

Вуглецеві інструментальні сплави легко розмагнічуються. Литі сплави, у порівнянні з вуглецевою сталлю мають більшу залишкову індукцію, але відзначаються невеликим коефіцієнтом відновлення.

Крім того, ферит-барієві магніти мають властивість практично повністю відновлювати магнітні властивості при складанні.

Їх можна намагнічувати попередньо, до складання і демонтувати для очищення зазорів без зміни їх сили.

У таблиці 3.1 приведені основні параметри ферит-барієвих матеріалів згідно ТУ 11-85 „Магніти із фериту марок 22РА220, 25РА150, 24РА230”.

Ферит-барієві магніти допускається використовувати у діапазоні температур -45...+85 °С.

Враховуючи особливості конструкції магнітного апарату у якості джерела магнітного поля використовуються магніти марки 22РА220, виконані у вигляді плоских плиток з розмірами 84х64х14.

Таблиця 3.1 Параметри ферит-барієвих матеріалів

Марка	Залишкова індукція В, Тл	Коерцитивна сила Нсм, кА/м	Добуток $(B \cdot H)_{\max}$, кДж/м ³
22РА220	0,36	220	22
24РА230	0,36	230	24
25РА150	0,38	150	25

Розрахунок геометричних розмірів робочого каналу

Геометрія робочого каналу визначається типом магнітних елементів, що використовуються, із умови забезпечення напруженості магнітного поля у межах $H=0,16-0,20$ Тл. Для визначення необхідної величини зазору між магнітами була поведена серія дослідів по вимірюванню індукції магнітного поля у періодичному середовищі. Магнітне середовище створювалось пакетом постійних магнітів з товщиною $\delta=14$ мм, встановлених на відстані δ_1 один від одного. Індукцію магнітного поля вимірювали комбінованим цифровим приладом Щ4310.

У результаті вимірювань визначено, що необхідна величина індукції магнітного поля $B=190-200$ мТл забезпечується при $\delta=14$ мм, що приблизно у 3 рази більше глибини очистки. Таким чином, створюється запас надійності при експлуатації, знижується ймовірність засмічення робочих каналів. Вивчення квантового ефекту показує, що у першому від межі зазорі співвідношення $B/B_{\max}$ складає 0,8, а уже в третьому досягає максимуму ($B/B_{\max}=1$). Зниження величини B у двох крайніх зазорах знаходиться у допустимих межах.

Експериментально встановлене оптимальне співвідношення δ_m/δ , при якому втрати магнітного потоку у навколишнє середовище максимальні. При цьому величину індукції, виміряну у робочому каналі, порівнювали з розрахунковою B_p .

Для вибраного варіанту магнітної системи з величиною $\delta=14$ мм одержимо

$$\delta_m/\delta=2 \cdot 14/14=2.$$

Таким чином, витрати магнітного поля на розсіювання не перевищують 10%.

Важливою характеристикою робочого каналу є питома поверхня змочування (обернена гідравлічному радіусу).

Використовується тонка гофрована пластина з немагнітного матеріалу. Вона вміщується у зазор між магнітами і розбиває його на окремі робочі

канали. Одночасно пластина закріплює магніти. Поперечний профіль пластини має трапецієвидну форму, еквівалентний діаметр робочого каналу:

$$d_e = \sqrt{\frac{4\omega}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 238 \cdot 10^{-6}}{3,14}} = 17,4 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

що задовольняє умові $6,4 \cdot 10^{-3} \leq d_e \leq 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Важливим експлуатаційним параметром є довжина впливу магнітного поля l_a , при виборі якого враховується: діапазон $l_a=0,05-0,30 \text{ м}$; забезпечення неоднорідного магнітного поля по довжині робочого каналу; технологічність складання магнітної системи, що складається з окремих магнітів (84x64x14).

Довжина впливу магнітного поля рівна $l_a \geq 2 \times 84 \text{ мм}$, звідки довжина робочого каналу $l_{p.k.}=210 \text{ мм}$.

Максимальний градієнт індукції магнітного поля рівний $\text{grad } B=7-10 \text{ Тл/м}$, що задовольняє умові ефективного застосування ПМА.

Розрахунок геометричних розмірів магнітного апарату. Вибір швидкості

Величина швидкості води у робочому каналі, його геометричні параметри і параметри магнітного поля – пов'язані величини. Тобто для даної конструкції магнітної системи існує оптимальний гідродинамічний режим обробки і відповідна йому швидкість води у зоні дії магнітного поля. Вибір швидкості руху води у робочому каналі проводиться, враховуючи вимоги: збільшення пропускної здатності при заданій продуктивності; мінімізація гідравлічних втрат напору

$$\Delta p = \frac{\xi \cdot V^2 \cdot \gamma}{2 \cdot g} \rightarrow \min ;$$

створення необхідного гідравлічного режиму можна пов'язати із мінімізацією числа Рейнольда

$$Re = \frac{V \cdot d_e}{\nu} \rightarrow \min;$$

Продуктивність магнітного апарату задана з умови забезпечення витрати охолоджуючої води на конденсатор $Q=25 \text{ тис. м}^3/\text{год}$.

Швидкість рекомендується приймати $V=1-5 \text{ м/с}$. Втрати напору будуть мінімальні при менших значеннях швидкостей. У той же час, чим менші швидкості, тим нижча пропускна здатність пристрою, це потребує збільшити

площу живого перерізу, тобто і габаритів установки, що негативно вплине на техніко-економічні показники.

Враховуючи, що допустимі втрати напору у магнітному апараті при його встановленні на напірному водогоні конденсатора К-7А ТГ-6 повинні складати не більше 0,5 м, вирахуємо оптимальну швидкість води, яка б задовольняла перерахованим умовам. Результати розрахунків уточнювалися у процесі гідравлічного моделювання. величина цієї швидкості складає $V_{p.k.}=2,4$ м/с. Тоді число Рейнольда,

$$R_e = \frac{V d_e}{\nu} = \frac{2,4 \cdot 17,4 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 42 \cdot 10^3,$$

що відповідає перехідному від ламінарного до турбулентного режиму руху рідини, дозволяє одержати непогані результати при ПМА води. ν – кінематична в'язкість води при 20°C, м²/с.

Площа живого перерізу магнітного апарату:

$$\omega_{ma} = \frac{Q}{3600 V_{p.k.}} = \frac{25000}{3600 \cdot 2,4} = 2,89 \text{ м}^2$$

Площа поперечного перерізу магнітного апарату з урахуванням вибраної конструкції магнітної системи:

$$\omega_k = \frac{\omega_{ma}}{m_c} = 2,89 / 0,24 \approx 12 \text{ м}^2,$$

де m_c – коефіцієнт магнітної системи, $m_c = \frac{\omega_{ma}}{\omega_k}$.

Розміри поперечного перерізу магнітної системи приймаються $b \times h = 3 \times 4$ м.

3.4 Робота установки АМА-25000

Магнітний апарат містить зварний корпус у вигляді вертикальної шахти (1) прямокутної форми з підвідною (3) і відвідною (4) камерами (у вигляді коробчатих дифузорів з кутом конусності 15°C), що забезпечують плавний перехід потоку від круглого перерізу труби ($\varnothing 2400$) до прямокутного перерізу апарату (3000 x 4000).

Усередині корпусу розташована магнітна система (МС), що складається з окремих уніфікованих магнітних блоків (УМБ), що дозволяє значно покращити експлуатаційні характеристики установки шляхом зниження трудомісткості і тривалості операцій по збиранню-розбиранню МС при її очищенні, ревізії та заміні. Розміри УМБ приймаються 470 x 480 x 260 мм, вага – 128 кг, кількість УМБ у МС – 48 шт.

Засіб кріплення УМБ виконаний у вигляді касети коміркової конструкції і являє собою зварну прямокутну раму з швелера № 30; комірки касети з розмірами 500 x 500 (в осях) утворені вертикальними стиками і поперечними планками, що дозволяє раціонально розподілити навантаження від УМБ і забезпечити міцність касети. Конструкція УМБ приведена на рис. 7.12.

Типовий магнітний блок (6) виконаний у вигляді просторового прямокутного каркасу (14), у якому розташована магнітна система. МС складається з плоских магнітних збірок (15), встановлених паралельно у вертикальному положенні на віддалі. Збірки набираються з постійних магнітів (16), у якості яких використовуються плоскі прямокутні плити ПП 84 x 64 x 14 мм з ферит-барію.

У межах збірки магніти розташовані попарно у два ряди, з роздільною вставкою (20) між ними, утворюючи суцільну бокову поверхню збірки.

Між збірками розташовані гофровані пластини (17), які є засобом кріплення магнітів у поперечному напрямку і, одночасно, утворюють з боковими поверхнями двох збірок робочі канали (18). Пластини встановлені так, що їх площини паралельні до осі потоку. Для фіксації магнітів у поздовжньому напрямку використовуються поперечні обмежувальні пластини каркасу (19).

Для забезпечення надійної експлуатації передбачена можливість швидкого демонтажу МС без розбірки корпусу і спорожнення напірного водогону конденсатора К-3А.

При необхідності очищення або ревізії МС зйомна кришка демонтується і касета за провушини видаляється з шахти. Час видалення складає 1 год.

Для видалення можливих мулових відкладень у магнітному апараті передбачена система очистки, виконана у вигляді двох циліндричних карманів з відсмоктуючими патрубками, розташованими у підвідній і відвідній камерах (дифузорах) та під'єднаних до насосної установки.

Охолоджуюча вода з приймального ковша БНС подається циркуляційними насосами по напірному водогону у вхідну камеру АМА-25000. Вхідна камера у вигляді коробчатого дифузора забезпечує поступовий перехід потоку від круглого перерізу трубопроводу до прямокутного перерізу касети з магнітною системою. Далі вода проходить по робочим каналам магнітної системи, піддається пошаровій обробці у поперечному неоднорідному магнітному полі. У результаті магнітогідродинамічного впливу у обробленій воді відбувається коагуляція феромагнітних і парамагнітних колоїдних частинок заліза, які набувають властивостей центрів кристалізації карбонату кальцію. Необхідною умовою для здійснення процесу ПМА є її пересиченість по CaCO_3 і наявність феромагнітних частинок заліза, концентрація яких повинна перевищувати 0,03 мг/л

Далі оброблена вода з апарату потрапляє у напірний водогін і у конденсатор турбіни, де нагрівається. При підігріванні відбувається розпад одного розчину бікарбонату кальцію:



Карбонат кальцію має від'ємний температурний коефіцієнт розчинності, що також сприяє випаданню CaCO_3 в осад.

Відділення карбонату кальцію з охолоджуючої води йде двома паралельними шляхами: кристалізація CaCO_3 на поверхні теплообміну, тобто на внутрішній поверхні трубок конденсаторів; відділення CaCO_3 у об'ємі потоку на центрах кристалізації карбонату кальцію.

У звичайних умовах нагрівання переважає процес відкладання CaCO_3 на поверхні. Це зумовлено тим, що у воді міститься недостатня кількість дисперсних частинок, які можуть бути центрами кристалізації.

В умовах ПМА воли у трубах теплообмінника йде об'ємна кристалізація карбонату кальцію у присутності великої кількості частинок ($M=10^{15} \text{ м}^{-3}$) дисперсної фази, які відіграють роль центрів кристалізації.

При цьому питома площа поверхні дисперсної фази ($S_{\text{д.ф.}}$) повинна бути не менше питомої площі поверхні теплообміну. Чим більша питома площа поверхні дисперсної фази у порівнянні з питомою площею поверхні теплообміну, тим менше карбонату кальцію відкладається на поверхні теплообміну і більш ефективний захист конденсатора від накипоутворення.

Відпрацьована у конденсаторі нагріта вода по зливному водоводу, а потім по збірному залізобетонному каналу подається на НСГ, звідки перекачується на охолодження у градирні.

Охолоджена у градирнях вода потрапляє у відкритий підвідний канал, а потім у ковш БНС. Цикл повторюється.

Запуск установки в роботу здійснюється разом із запуском у роботу циркуляційного насоса ЦН-7А системи технічного водопостачання конденсаційної установки К-7А ТГ-6. Після включення циркуляційного насоса ЦН-7А відкрити вентиль для видалення повітря з корпусу апарату (до появи води у ньому). Вентиль розташований у камері установки на відм. -6,0 м. Перевірити величину перепаду тисків на апараті по вторинному самопищучому приладу, встановленому у будівлі для обслуговування установки. Впевнитися у тому, що перепад тиску не перевищує гранично допустимої величини – 20 кПа (0,2 кгс/см²). Номінальна величина перепаду тиску – 6 кПа (0,06 кгс/см²).

3.5 Знешкодження відкладень, які утворюються на внутрішній поверхні теплообмінних апаратів системи зворотнього водопостачання

Циркуляційна вода зворотної системи водопостачання характеризується підвищеним солевмістом, високою температурою, загальною жорсткістю до 10-12 мг*екв/л, коефіцієнт насичення за карбонатом кальцію досягає $K_{\text{нас}} = 15-30$. Це призводить до інтенсивного утворення відкладень на внутрішній

поверхні теплообмінних апаратів циркуляційної системи, особливо у трубках конденсаторів.

Хімічний склад відкладень, знятих з внутрішньої поверхні трубок конденсаторів турбін показує, що вони мають карбонатний характер: CaO – 47,6%, MgO – 1.7%, SiO₂ – 1.8%, Fe₂O₃ – 0.9%, CuO+ZnO – 1.0%, NiO – 0.2%, P₂O₅ – 0.2%, SO₃ – 3.0%. Органічна частина – 3,2%. Втрати при прожарюванні складають близько 40%.

При кислотній відливці одного конденсатора типу К-12150, за результатами багаторічних спостережень, видаляється близько 20-25 т відкладень (періодичність відливок 6-8 місяців).

3.6 Автоматизація процесу охолодження у конденсаторах турбін і роботи апарату АМА-25000

З метою здійснення оперативного контролю та регулювання процесів охолодження у конденсаторах турбін встановлена система контрольно-вимірювальних приладів (КВП).

Відпрацьована у турбіні водяна пара направляється у конденсатор, де охолоджується і конденсується. Нагріта циркуляційна вода після конденсаторів скидається у відкритий відвідний канал, звідки насосними станціями подається на градирні, де відбувається її охолодження.

На листі наведена структурна і функціональна схема здійснення контролю та регулювання процесів охолодження у конденсаторах К-7А, К-7Б турбогенератора ТГ-6.

Для вимірювання перепаду тиску на трубопроводах подачі охолодженої і відведення нагрітої циркуляційної води використовується комплект приладів, що складається з давачів-перетворювачів типу „Сапфір-22 ДД” моделі 2440 і вторинних приладів типу КСУ-004, які забезпечують дистанційне вимірювання тиску, сигналізують про відхилення контрольованого параметру від заданого значення. Максимальне значення перепаду тиску на трубопроводах охолодження складає 0,63 кгс/см².

Для вимірювання перепаду тиску на апараті АМА-25000 використовується комплект приладів, що складається з давача типу „Сапфір-22 ДД” моделі 2440 і вторинного приладу типу КСУ-002.максимальне значення перепаду тиску на апараті складає 2,5 кгс/см².

У комплект апаратури, який застосовується для вимірювання температур на трубопроводах, включені: давач температури з термоперетворювачами опору типу Т 419-03, вторинний прилад, з'єднувальні провідники, джерело струму.

Сигнали від вторинних приладів передаються на мікроконтроллер, який виконує функцію регулятора.

Регулювання температури циркуляційної води на вході та виході з конденсаторів реалізується шляхом зміни її витрати двома способами: дроселюванням за допомогою засувки, встановленої на трубопроводі відведення нагрітої води, або регулюванням частоти обертання лопатей осьового насоса на блочній насосній станції (БНС).

3.7 Опис функціональної схеми автоматизації

В даній схемі автоматизації охолодження турбогенератора налічується чотири кола автоматичного керування. З них два кола регулювання температурою, по одному колу регулювання осьовим насосом і засувкою, а також два кола регулювання тиском.

Розглянемо кожне з цих кіл окремо:

Коло регулювання температурою холодоагенту складається з чутливого елементу температури який встановлюється в трубопроводі після апарату магнітної активації води. Сигнал від чутливого елементу надходить до мікро контролера , який сприймає сигнал від чутливого елементу і перетворює його в уніфікований сигнал який сприймає контролер. Контролер є універсальним регулятором так як до нього надходять сигнали не лише від систем які контролюються температурою, а й іншими параметрами.контролер обробляє

сигнал який надходить до його і визначає ступінь подачі холодоагенту осьовим насосом.

Коло регулювання перепадом тиску до і після апарату магнітної активації води складається з чутливого елементу який сприймає два значення величини тиску. Чутливий елемент передає сприйнятий сигнал до давача перепаду тиску, який визначає даний перепад. Від давача перепаду тиску сигнал надходить до перетворювача, який перетворює даний сигнал в уніфікований сигнал який сприймають контролер. Контролер обробляє сигнал який до нього надійшов і віддає команду на осьовий насос чи засувку в залежності від потреби збільшення або зменшення даного значення.

Коло регулювання перепадом тиску між холодною водою до конденсатора і нагрітою водою після нього складається з : чутливого елементу який сприймає два значення величини тиску і передає у вигляді сигналу до давача перепаду тиску, який визначає величину перепаду. Даний сигнал надходить до перетворювача. Перетворювач сприймає сигнал і перетворює його в уніфікований сигнал на якому працюють вторинний прилад контролю тиску контролер. Контролер обробляє величину перепаду і визначає чи збільшити або зменшити подачу холодної води за допомогою насоса, або відкрити чи закрити засувку контролю гарячої води.

Коло регулювання температурою гарячої води складається з чутливого елементу температури який встановлюється в трубопроводі. Сигнал від чутливого елементу надходить до перетворювача. Перетворювач перетворює сигнал чутливого елементу в уніфікований сигнал який сприймають вторинний прилад температури і контролер. Контролер обробляє сигнал і спрямовує сигнал на осьовий насос, який збільшує або зменшує подачу холодної води.

3.8 Дослідження оборотних охолоджуючих систем водопостачання за допомогою математичного моделювання

Оцінка та прогнозування інтенсивності накипоутворення в оборотних системах базується на застосуванні математичного моделювання. Наявність

точних аналітичних розв'язків забезпечує можливість оперативного аналізу поведінки системи у разі зміни її технологічного регламенту. Практичне застосування розроблених моделей на основі реальних виробничих показників дозволило спрогнозувати швидкість росту сольових відкладень та обґрунтувати заходи щодо їхнього попередження.

На промислових підприємствах вода використовується для слідуючи виробничих потреб: для охолодження обладнання, а також в якості середовища для транспортування механічних або розчинених домішок, що потрапляють у

У системах прямооточного водопостачання вода із річки подається на очисні споруди (у разі необхідності), а далі - на підприємство. Використана вода після каналізаційних очисних споруд скидається у річку. Такі системи прямооточного водопостачання використовуються при розташуванні підприємств на відносно низьких відмітках поверхні землі поблизу потужної водойми. Якість води, що скидається у водойми, повинна задовольняти санітарним вимогам і згубно не впливати на рибне господарство.

Використання прямооточних систем стає можливим лише за умов техніко - економічних переваг з узгодженням з органами регулювання, раціонального використання та охорони води.

Якщо водоспоживання цехів другого підприємства менше, ніж першого, надлишок незабрудненої (очищеної) води подається у водостік, якщо ж навпаки, то необхідна додаткова кількість води, в залежності від місцевих умов подається від очисних споруд каналізації або із природного джерела.

У системах оборотного водопостачання вода, використана споживачами не скидається у водойми, а після очищення та охолодження (як правило, на градирнях) знову поступає у цехи підприємства. Оскільки частина води втрачається системою (випаровується, входить до складу продукції, скидається при продувці, тощо) то таку циркуляційну систему необхідно підживлювати або очищеною водою, або водою з природного джерела.

В залежності від якості води, що використовується на виробництві і від розташування цехів та установок, які споживають воду, на підприємстві може бути декілька систем (циклів) оборотного водопостачання. Вода, що циркулює

в системах, може відрізнятися своїм складом, напором, температурою, якщо у системі оборотного водопостачання передбачаються охолоджувачі, очисні та утилізуючі споруди, то організуються замкнені або безстічні цикли водопостачання, які дають змогу зменшити споживання свіжої води та виключити склад забрудненої води у водойми. Комбіновані системи водопостачання влаштовуються на багатьох підприємствах, де в залежності від ряду факторів, у різних цехах і установках використовуються різні схеми, які об'єднуються у загальну систему.

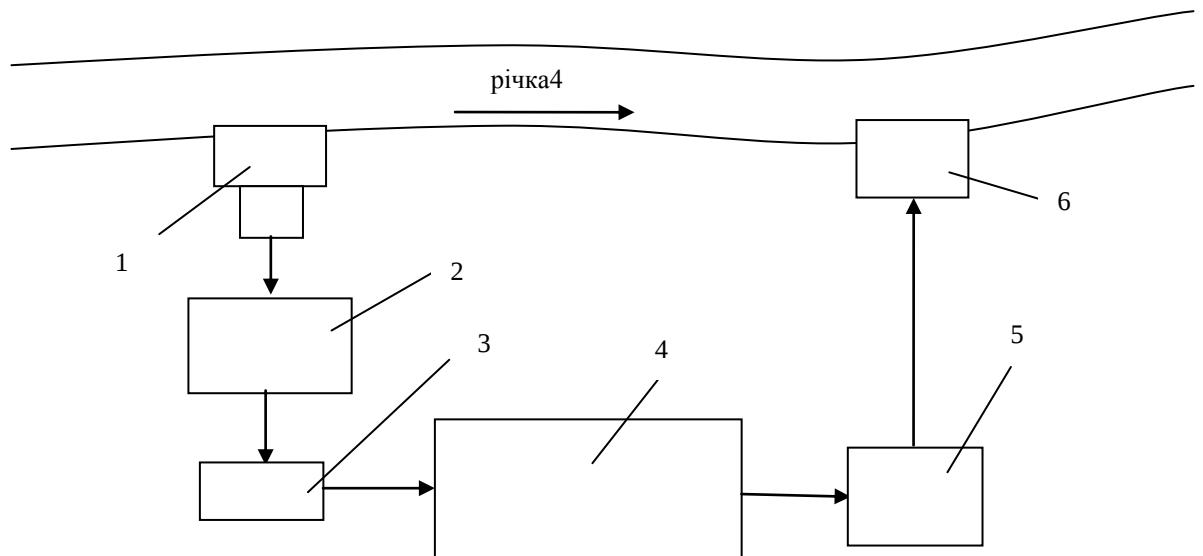


Рисунок 3.1 Схеми прямооточної системи водопостачання промислового підприємства

1-водозабір, суміщений з насосною станцією 1-го підняття; 2 – водоочисна станція; 3 – насосна станція 2-го підняття; 4 – об'єкт водопостачання (промислове підприємство); 5 – каналізаційні водоочисні споруди; 6-випуск очищених стічних вод.

Поряд з основною схемою оборотного водопостачання можуть використовуватися для окремих споживачів прямотічні системи водопостачання. Прямотічний водопровід іноді може бути об'єднаний з господарсько-питним та протипожежним. Нагріта чиста вода за певних умов може бути використана для живлення установок, в яких дозволяється використання нагрітої води.

3.9 Режим охолоджуючої води в об'ємних системах водопостачання

У вихідних даних при проектуванні оборотних систем, вказуються втрати води у кількісному та процентному відношеннях на випаровування, винос вітром, продувку.

Втрати води на продувку визначаються в залежності від якості оборотної води та води, що додається, а також від способу її обробки. При цьому, у втрати на продувку слід включати, якщо це потрібно, додаткові витрати води на виробничі потреби. Необхідність обробки води визначається розрахунком, окремо для літнього та зимового режимів роботи системи оборотного водопостачання, при співвідношенні

$$L_{\text{дод}} \cdot K_v > 3$$

де $L_{\text{дод}}$ – лужність води, що додається, мг·екв/л; K_v – коефіцієнт випаровування, який визначається так

$$K_v = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3},$$

де P_1 , P_2 , P_3 – втрати води відповідно до випаровування, винос вітром та продувку, %.

Лужність оборотної води визначається за формулою:

$$L_{\text{зв}} = 0,22N^2(P - P_1) + 0,1N\sqrt{4,84N^2(P - P_2)^2 + (100 - P)\text{CO}_2^{\text{охол}} + p\text{CO}_2^{\text{дод}} + 44L_{\text{дод}}},$$

де $P_1 + P_2 + P_3$ – втрати води у системі, %.

$$N = \frac{\varphi}{K_2\text{Ca}^{\text{дод}}}, \quad (4.4)$$

де φ – коефіцієнт, який залежить від загального солемісту у оборотній воді та її температури після охолодження; відповідно кількість у воді, що додається кальція, вуглекислоти, мг/кг, а також її лужність, мг·екв/л; концентрація CO_2 у оборотній воді після охолоджувача, мг/л; $S_{\text{дод}}$ – солеміст води, що додається.

Необхідно зауважити, що хімія води у оборотних системах ще недостатньо вивчена.

Практично в даний час суто емпірично підходять до розв'язування конкретних задач організації водно-хімічних режимів у оборотних системах. Багато спеціалістів впевнені, що володіють певними теоретичними обґрунтуваннями цих складних процесів. Але це не так, оскільки наші знання у цій області – це вибір практичних рецептів і деяких уявлень, запозичених із фізичної хімії. Відсутність достатніх знань стосовно процесів у оборотних системах на практиці призводить до явища накипоутворення.

Причиною утворення накипу є порушення вуглекислотної рівноваги, що обумовлюється нагріванням води та втратою вільної вуглекислоти.

Одним із методів запобігання утворенню накипу у оборотних системах є продувка води із циркуляційної системи охолодження. Витрати води на продувку визначаються за умов, що збільшення твердості води, що відбувається за умов випаровування частини води, не повинно перевищувати певних меж.

При продувці разом із водою вилучається частина солей твердості. З підвищенням твердості у системі збільшується кількість солей, що вилучається до тих пір, поки не встановиться рівновага між кількістю солей, що поступають із водою, яка додається у систему і кількістю солей у системі. Продувка використовується у тому випадку, коли твердість води, що додається, менше допустимої твердості оборотної води; у більшості випадків однієї продувки системи недостатньо.

Для запобігання утворення накипу необхідна або відповідна хімічна обробка, або один із безреагентних методів обробки води (ультразвуковий, магнітна обробка).

3.10 Математичне моделювання режимів роботи оборотних систем водопостачання

Розглядається оборотна система водопостачання підприємства при використанні для її підживлення неочищеної води.

Використовуючи закон збереження речовини, будується математична модель зміни у часі (кінетики) концентрації іонів у воді

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{M}(C_o - pC) - kC,$$

де C – концентрація іонів солей у воді, що циркулює у оборотній системі, мг/л; C_o – концентрація іонів солей у воді, що підживлює циркуляційну систему, мг/л; Q – витрата підживлюючої води, м³/год; M – об'єм води у циркуляційній системі, м³; p – доля води, що скидається із циркуляційної системи (від витрат підживлюючої води), відн. од.; K – константа швидкості утворення накипу, год⁻¹.

Маємо лінійне диференціальне рівняння першого порядку, його можна звести до інтегралів за допомогою підстановки

$$C = U \cdot V,$$

де U і V – неперервні та диференційовані на деякому проміжку.

Продиференціюємо вираз

$$\frac{dC}{dt} = \frac{dU}{dt} V + U \frac{dV}{dt},$$

Підставляючи вираз одержимо

$$\frac{dU}{dt} V + U \frac{dV}{dt} = \frac{Q}{M}(C_o - pUV) - kUV;$$

$$V \left[\frac{dU}{dt} + U \left(\frac{pQ}{M} + k \right) \right] + U \frac{dU}{dt} = \frac{Q}{M} C_o.$$

Виберемо функцію Q з точністю до сталої так, щоб вираз у дужках дорівнював нулю

$$\frac{dU}{dt} + U \left(\frac{pQ}{M} + k \right) = 0,$$

тоді

$$U \frac{dV}{dt} = U \frac{Q}{M} C_o,$$

Рівняння– з роздільними змінними, розв'яжемо його (помножуючи ліву та праву частину на $\frac{dt}{dU}$)

$$\frac{dU}{U} + \left(\frac{pQ}{M} + k \right) dt = 0$$

$$\int \frac{dU}{U} + \int \left(\frac{pQ}{M} + k \right) dt = \int 0 dt$$

$$\ln U + \left(\frac{pQ}{M} + k \right) t = 0 + Z_1,$$

де Z_1 – стала інтегрування;

Початкові умови: при $t = 0$

$$U = U_0$$

$$Z_1 = \ln U_0$$

Будемо мати

$$\ln U + \left(\frac{pQ}{M} + k \right) t = \ln U_0,$$

$$(\ln U - \ln U_0) = -\frac{Q}{M} + \left(p + \frac{kM}{Q} \right) t,$$

$$U = U_0 e^{-\frac{Q}{M} + \left(p + \frac{kM}{Q} \right) t}.$$

З рівняння маємо

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{U} \frac{Q}{M} C_0.$$

Підставимо у вираз

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{U_0 e^{-\frac{Q}{M} + \left(p + \frac{kM}{Q} \right) t}} \frac{Q}{M} C_0 = \frac{C_0 Q}{U_0 M} e^{\frac{Q}{M} + \left(p + \frac{kM}{Q} \right) t}$$

$$C - \frac{C_0}{p + \frac{kM}{Q}} = e^{-\frac{Q}{M} + \left(p + \frac{kM}{Q} \right) t} \left(C_0 - \frac{C_0}{p + \frac{kM}{Q}} \right);$$

$$\frac{C \left(p + \frac{kM}{Q} \right) - C_0}{p + \frac{kM}{Q}} = \frac{C \left(p + \frac{kM}{Q} \right) - C_0}{p + \frac{kM}{Q}} e^{-\frac{Q}{M} + \left(p + \frac{kM}{Q} \right) t};$$

Домножимо ліву і праву частини на вираз $\left(p + \frac{kM}{Q} \right)$

$$\frac{C \left(p + \frac{kM}{Q} \right) - C_0}{C_0 \left(p + \frac{kM}{Q} \right) - C_0} = e^{-\frac{Q}{M} + \left(p + \frac{kM}{Q} \right) t}$$

Рівняння є розв'язком лінійного диференціального рівняння.

За умов рівноваги процесу при $t \rightarrow \infty$ знайдемо формулу для визначення константи швидкості утворення накипу k

$$\frac{C \left(p + \frac{kM}{Q} \right) - C_0}{C_0 \left(p + \frac{kM}{Q} \right) - C_0} \rightarrow 0;$$

$$K = \frac{Q}{M} \left(\frac{C_0}{C} - p \right)$$

На основі рівняння можна зробити висновки: константа швидкості реакції утворення накипу у циркуляційній системі пропорційна відношенню $\frac{Q}{M}$ і різниці $\left(\frac{C_0}{C} - p \right)$; якщо $\frac{C_0}{C} \rightarrow 1$ і $p \rightarrow 1$, що характерно для проточних оборотних систем, $k \rightarrow 0$; $\frac{C_0}{C} \rightarrow p$, $k \rightarrow 0$.

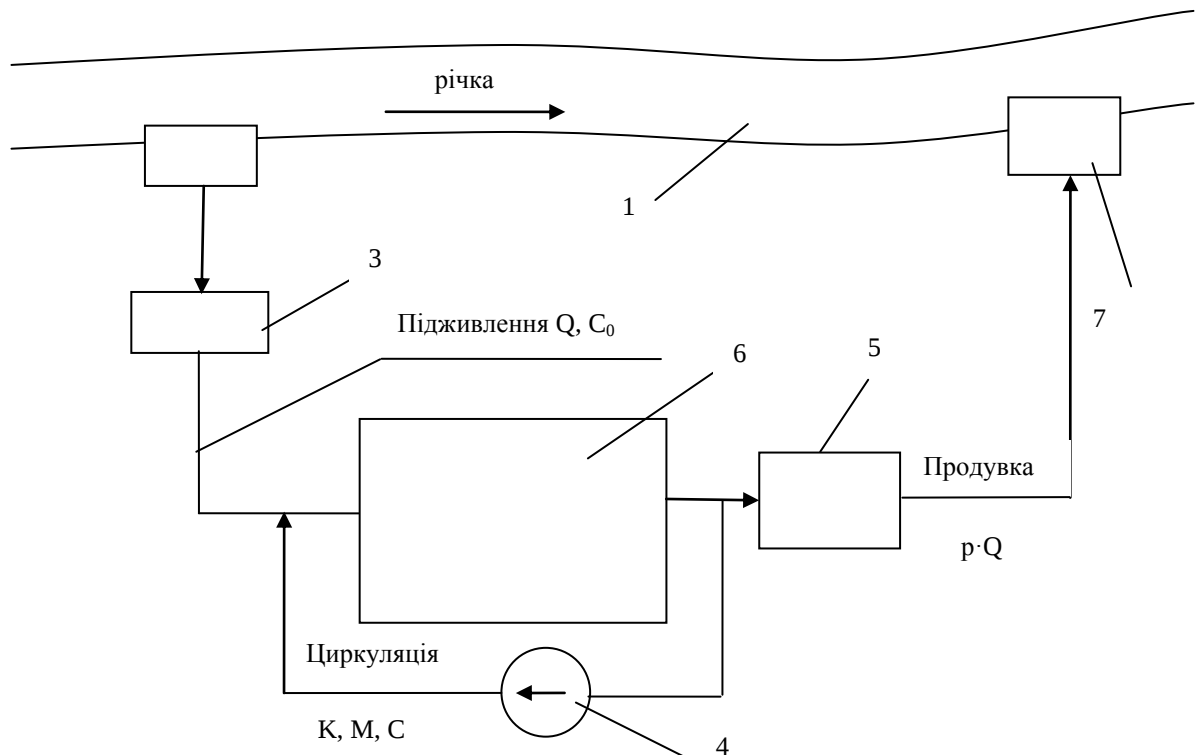


Рисунок 3.2 Схема оборотної системи водопостачання підприємства з використанням для підживлення неочищеної води.

1-джерело водопостачання; 2-водозабірні споруди; 3-НС-I; 4-циркуляційний насос; 5-каналізаційні очисні споруди; 6-промислове підприємство; 7-випуск.

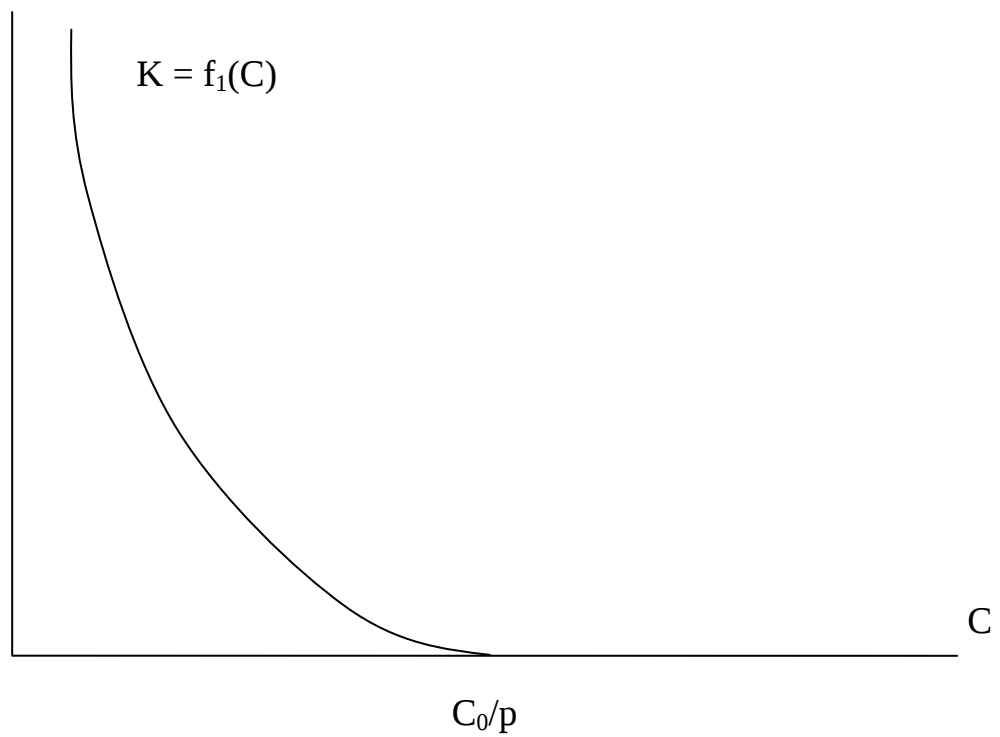
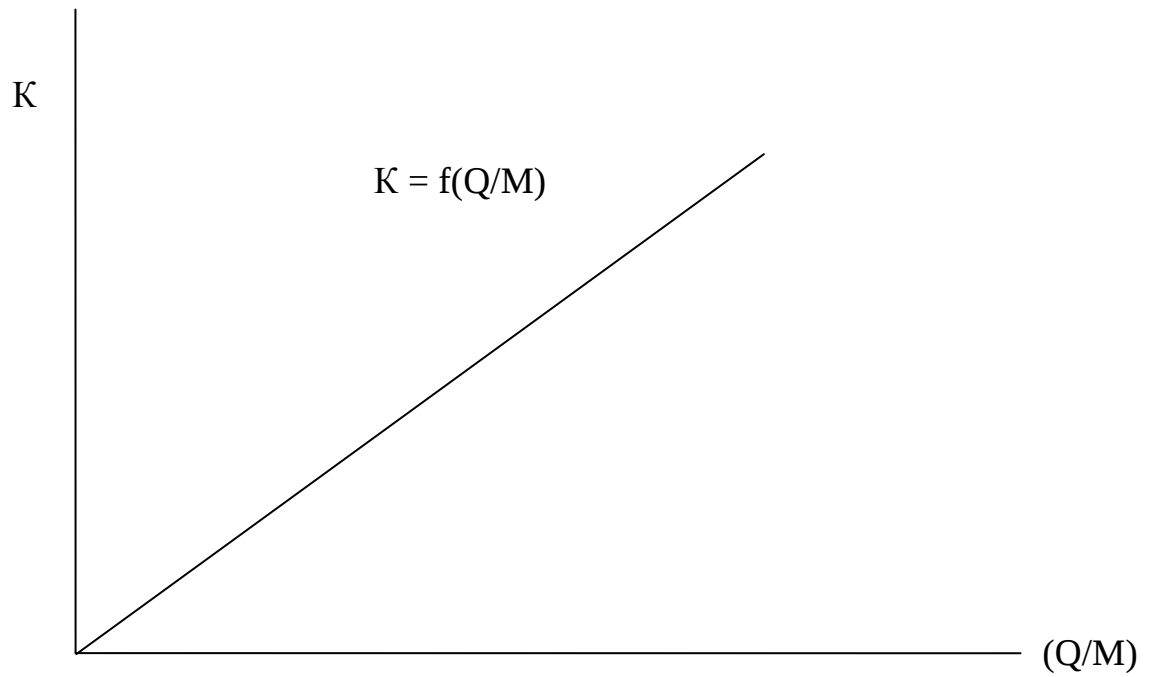


Рисунок 3.3 Графічні залежності константи швидкості утворення накипу від величини Q/M , C .

Математична модель утворення накипу за умов очищення води, що підживлює циркуляційну систему

Об'єктом дослідження є оборотна система водопостачання промислового підприємства, у циркуляційний контур якої для підживлення подається очищена річкова вода (принципову схему процесу наведено на рис. 3.3)

За законом збереження речовини можна записати

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{M} \left[C_0(1-\alpha) + C_1 - C \left(p + \frac{kM}{Q} \right) \right]$$

де C_1 - концентрація іонів солей у підживлюючій воді після II очищення, мг/л; α – доля підживлюючої води, що очищається, відн. од.

Отриманий вираз є лінійним диференціальним рівнянням першого порядку, метод інтегрування якого є класичним для задач хімічної кінетики. Після розділення змінних, інтегрування та виконання алгебраїчних перетворень отримано аналітичну залежність, яка дозволяє розрахувати константу швидкості утворення накипу на основі експериментальних даних динаміки жорсткості.

$$K = \frac{Q}{M} \left[(1-\alpha) \frac{C_0}{C} + \alpha \frac{C_1}{C} - p \right],$$

З рівняння можна зробити висновок, що мінімальна швидкість процесу накипоутворення досягається при долі води, що очищається

$$\alpha = \frac{C_0 - pC}{C_0 - C_1}$$

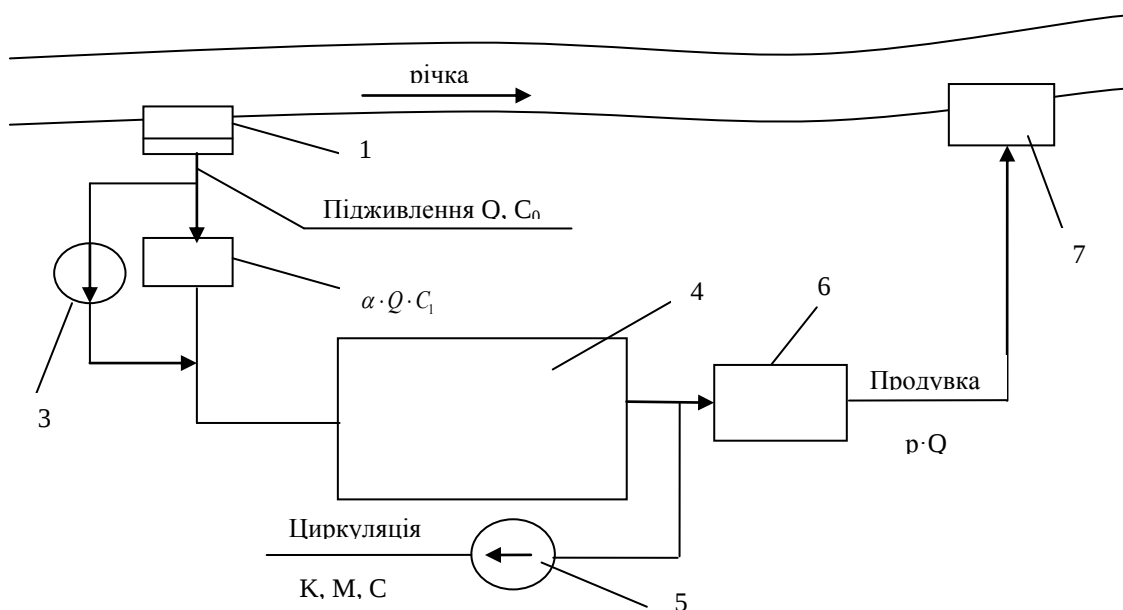


Рисунок 3.4 Схема оборотної системи водопостачання підприємства при використанні для підживлення частини очищеної води.

1-водозабірний комплекс, суміщений із НС-I; 2 - споруди очищення води; 3- обвідний насосний агрегат; 4-виробничий майданчик підприємства; 5-насос циркуляційного контуру; 6-споруди очищення стічних вод; 7-скид (випуск) очищених стоків.

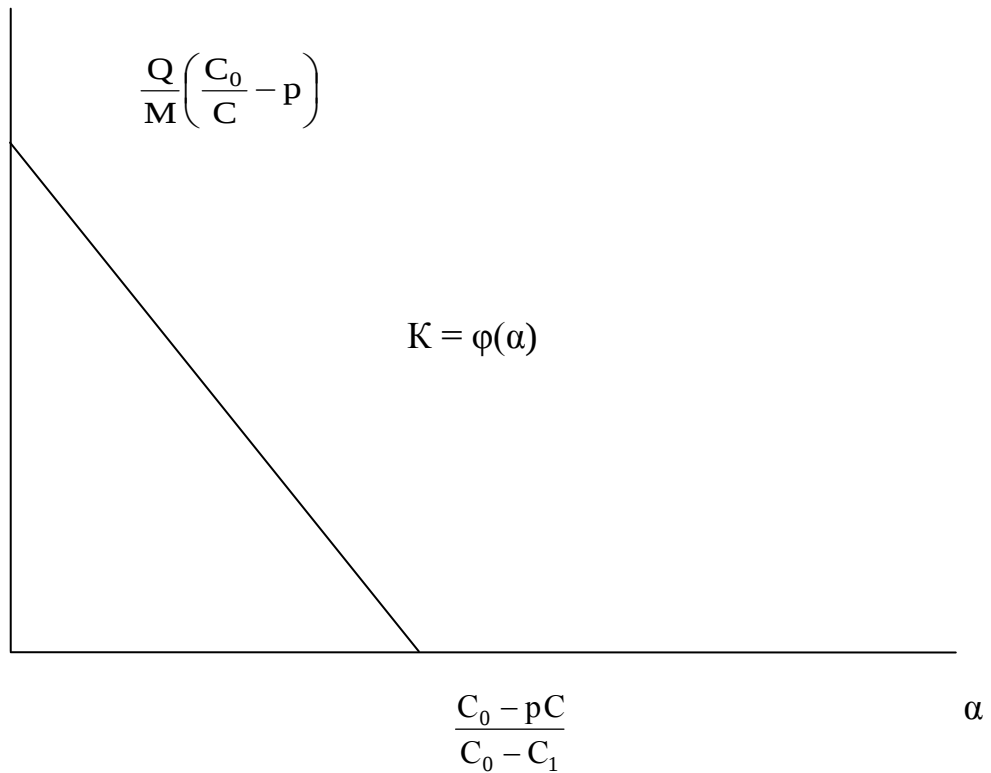


Рисунок 3.5 Графічна залежність константи швидкості утворення накипу від долі підживлюючої води

В результаті розрахунків виявлена можливість значно зменшити долю витрат води з 24,4% до 12,7-1,3%, зменшити загальну витрату води, що підживлює цирк систему на 13,4 – 23,4% (відповідно на 1065 – 1863м³/год).

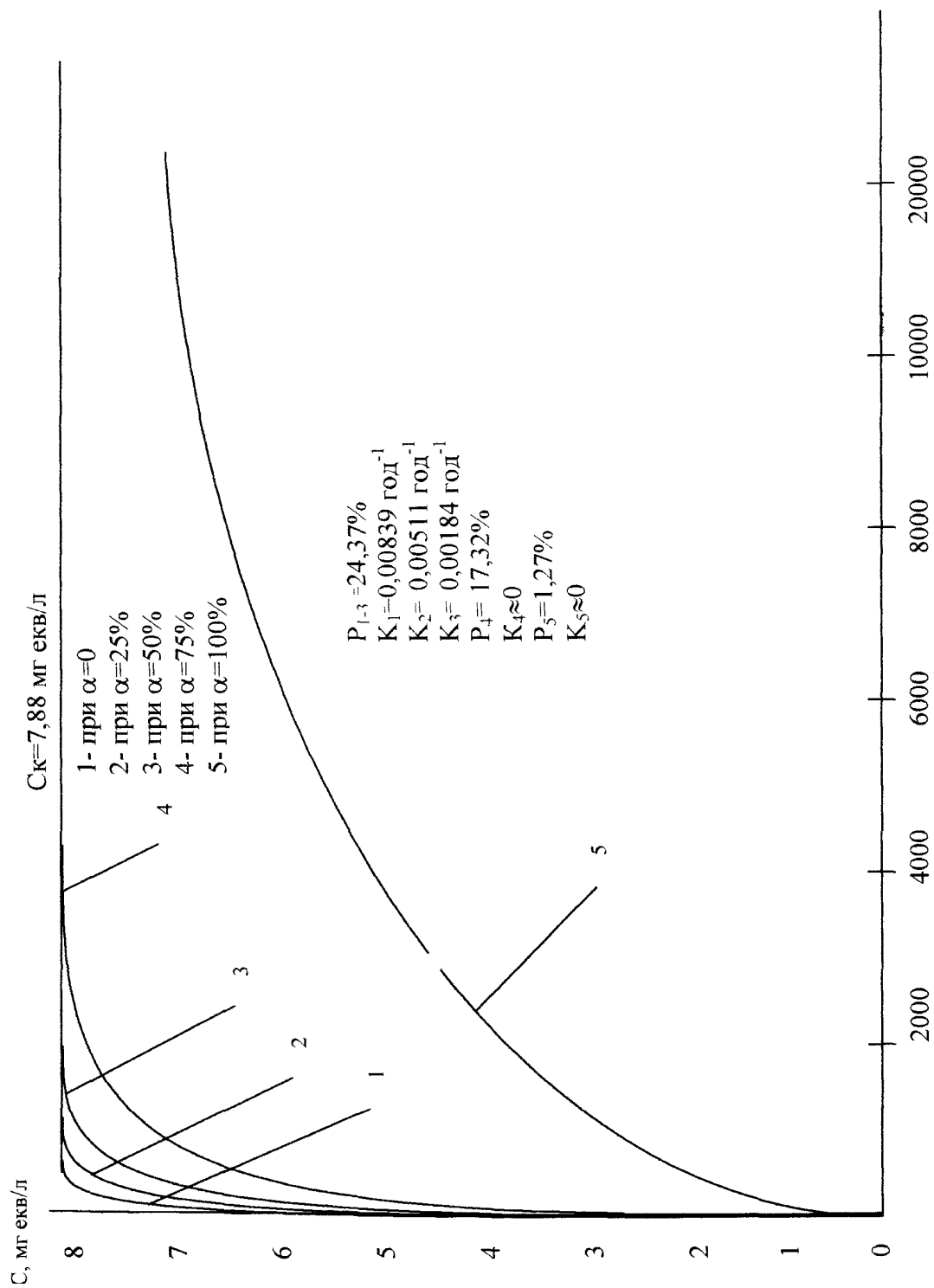


Рисунок 3.6 Зміна у часі загальної жорсткості циркуляційної води C_1
 $= 0.1 \text{ мг экв./л}$ (ефективність очищення на ВОС $E_\phi = 99.8\%$)

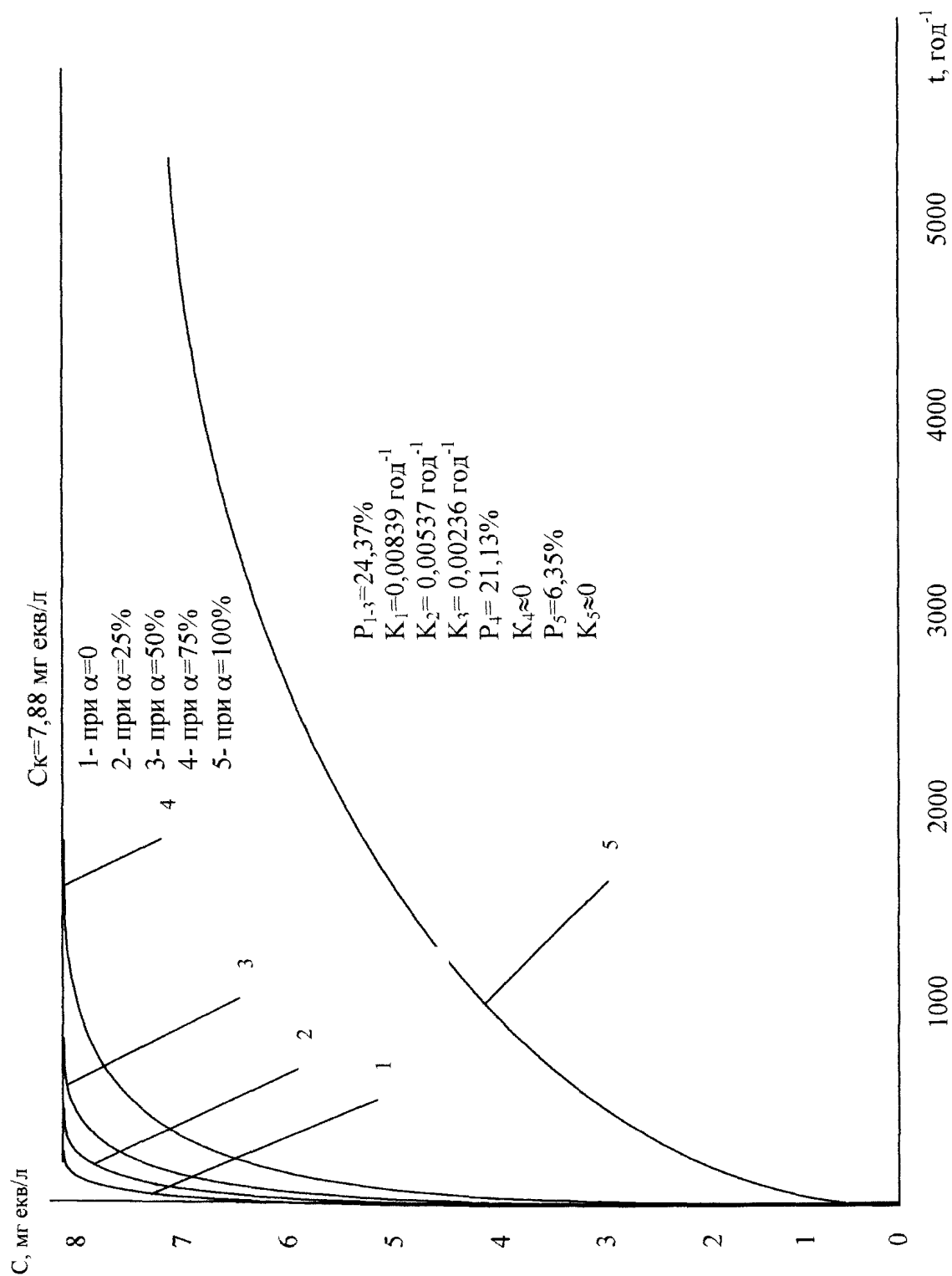


Рисунок 3.7 Зміна у часі загальної жорсткості циркуляційної води C_1
 $= 0,5 \text{ мг екв/л}$ (ефективність очищення на ВОС $E_{\phi} = 90,3\%$)

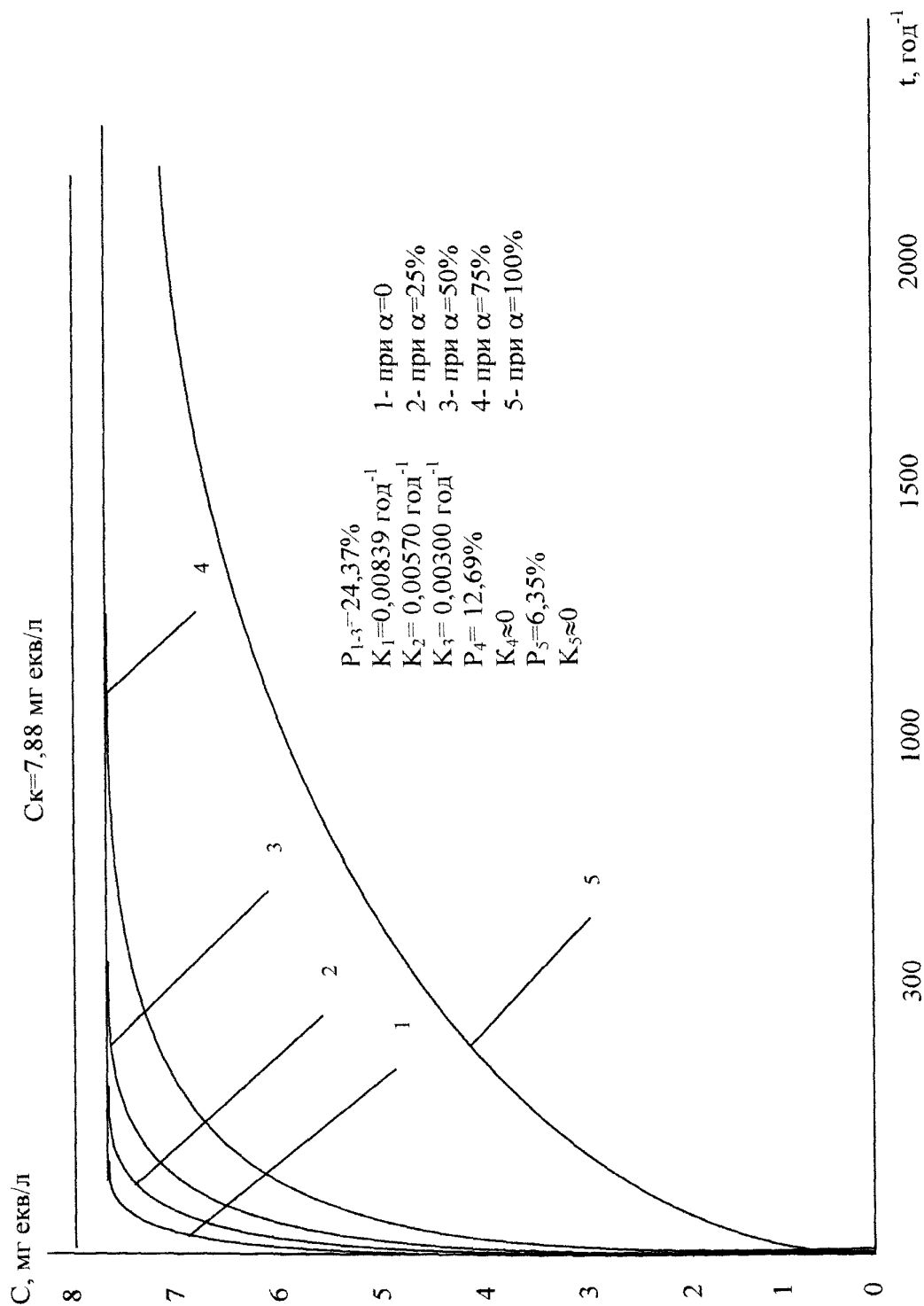


Рисунок 3.8 Зміна у часі загальної жорсткості циркуляційної води C_1
 $=0,1$ мг екв/ л (ефективність очищення на ВОС $E_{\phi}=80,6\%$)

Застосування методу математичного моделювання є найбільш ефективним підходом для кількісної оцінки параметрів накипоутворення. Він дозволяє детально розкрити фізико-хімічний механізм процесу, забезпечує високу точність прогнозування та відкриває можливості для спрямованого керування водним режимом оборотної системи.

3.11 Розрахунок та моделювання САР

Основними критеріями вибору структури САР процесу магнітної активації води служать статична характеристика процесу магнітної активації відповідними реагентами, діапазону коливань концентрації води, динамічні характеристики об'єкта регулювання, і необхідна якість регулювання витрати подачі води. Роботоздатна система автоматичного регулювання процесу магнітної активації може бути побудована тільки з одночасним врахуванням всіх перерахованих факторів.

Розрахунок системи автоматичного регулювання технологічних процесів, в тому числі процесів охолодження в конденсаторах, полягає в виборі регулятора (точніше закону регулювання) і в визначенні його параметрів настройки у відповідності з вимогами, пред'явленими щодо даного процесу регулювання.

Структурну схему підбирають на основі математичної моделі системи регулювання, потім підбирають технічні засоби автоматичного управління і розраховують параметри регуляторів.

При оцінці впливу на роботу САР частоти зовнішніх збурень слід співставляти період цих коливань з часом регулювання системи, тобто з тривалістю обробки регулятором наступного збурення. Звичайно. Щоб забезпечити нормальну роботу САР, не можна допускати повторюваних накладок нових збурень на незбалансований об'єкт. Іншими словами, період коливань збурюючого фактора повина бути більшим ніж час регулювання САР (принцип інваріантності).

Застосування ПД регулятора може привести до тривалого відхилення параметрів від заданого значення через співпадання швидкостей зміни вихідного сигналу і переміщення регулюючого органа в астатичному режимі роботи регулятора. Вирішення задачі в даному випадку слід шукати у виборі відповідних динамічних настройок регулятора, застосуванні ПІ-регулювання або в ускладненні структури САР.

Як вже зазначалося, при підборі регулятора показниками служать частота і глибина збурень, характеристики об'єкта регулювання, допустимі відхилення параметра регулювання в перехідному і встановленому режимах роботи.

Вплив амплітуди збурень на динамічне відхилення параметра регулювання x_p при роботі регулятора оцінюється динамічним коефіцієнтом регулювання R_d :

$$R_d = x_p / x_0$$

де x_0 - відхилення параметра при тому ж збуренні і відключеному регуляторі.

Як бачимо, ступінь затухання має від'ємне значення при розхідному процесі, дорівнює нулю при встановлених коливаннях і одиниці при аперіодичному процесі. Показником якості регулювання у встановленому режимі є величина статичної нерівномірності. Залишкове відхилення параметра властиве П-регуляторам і в меншій мірі -ПІД-регуляторам. В останньому випадку можливе тривале відхилення параметра регулювання, викликане характером збурень. Параметрами настройки безперервних регуляторів служать: ступінь (швидкість) зворотнього зв'язку δ для П-регулятора і в меншій мірі - ПІД-регуляторам. В останньому випадку можливе довготермінове відхилення параметра регулювання, що зумовлене характером збурень.

Отже, в даній САР застосуємо ПІ -регулятор.

3.12 Дослідження контура регулювання.

В даному процесі ми будемо використовувати систему регулювання витрати гарячої води за допомогою співвідношення витрат між гарячою водою і холодною водою яка поступає до конденсаторів після магнітного активатора.

Такі системи використовують для регулювання двох технологічних параметрів, які мають бути пропорційно залежними. В нашому випадку така система регулює співвідношення:витрата холодної і гарячої води яке має бути 1:1.2.

Вона містить замкнуту одноконтурну систему регулювання, яка називається веденою і ланку збурення – ведуча ланка. Якщо зміниться витрата X_2 , то система регулювання шляхом зміни поперечного перерізу трубопроводу виконавчим механізмом, поверне її до попереднього значення. Але вразі зміни витрати X_1 система регулювання має відповідно змінити витрату X_2 , причому пропорційно витраті ведучого потоку.

Передаточна функція по каналу X_1-Y , буде мати вигляд:

$$W_1 = \frac{Y(p)}{X_1(p)} = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_6 \cdot W_7}{1 + W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5};$$

Передаточна функція по каналу X_2-Y буде мати вигляд:

$$W_2(p) = \frac{Y(p)}{X_2(p)} = \frac{W_3}{1 + W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5}.$$

Знайдемо передаточну функцію $W(p) = \frac{X_1(p)}{X_2(p)}$:

$$W(p) = \frac{W_2(p)}{W_1(p)} = \frac{X_1(p)}{X_2(p)} = \frac{1}{W_1 \cdot W_2 \cdot W_6 \cdot W_7}.$$

Звідки видно, що динамічні властивості об'єкта регулювання системи регулювання другого потоку не впливають на динамічні характеристики системи регулювання співвідношення. У разі зміни завдання регулятора передаточна функція по каналу $U-Y$, буде мати вигляд:

$$W_p(p) = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3}{1 + W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5};$$

Систему регулювання необхідно досліджувати по каналу X_1-X_2 для визначення якості регулювання співвідношення, а також по каналу $U-Y$ для визначення якості регулювання вразі зміни завдання.

Розрахуємо коефіцієнти настроювання регулятора

Виберемо регулятор з ПІ законом регулювання.

Передаточна функція регулятора:

$$W_1(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_p \cdot p} \right) = K_p \frac{T_p j\omega + 1}{T_p j\omega};$$

В даному випадку об'єктом регулювання є трубопровід відводу холодної води з конденсаторів.

3.13 Розрахунок перехідної характеристики

Дану характеристику ми можемо визначити за допомогою математичної моделі трубопроводу.

Визначення постійних часу об'єкта. У встановленому потоці швидкість рідини в трубопроводі залежить від перепаду тиску:

$$u^2 = C^2 2g \frac{\Delta p}{\gamma}$$

де u - швидкість, C - коефіцієнт витрати, g - прискорення сили тяжіння, Δp – перепад тиску, γ - питома вага рідини.

Швидкість прямо пропорційна витраті:

$$u = \frac{F}{A}$$

де F - витрата, A - площа поперечного перерізу.

Отже, перепад тиску при встановленому потоці:

$$\Delta p = \frac{u^2 \gamma}{2gC^2} = \frac{F^2 \gamma}{2gA^2C^2}$$

Якщо прикладена сила $A\Delta p$ перевищує гідродинамічний опір трубопроводу, то потік почне переміщуватись з прискоренням. Перепишемо рівняння невстановленого руху рідини, враховуючи, що результуюча сила потоку рівна масі помноженій на прискорення:

$$A\Delta p = \frac{AF^2\gamma}{2g^2A^2C^2} + M \frac{du}{dt},$$

де M - маса; t - час.

Маса рідини в трубопроводі

$$M = \frac{LA\gamma}{g}$$

де L - довжина трубопроводу.

Виконавши перестановку членів в рівнянні руху рідини і підставивши значення M , отримаємо:

$$\frac{F^2\gamma}{2g^2A^2C^2} + \frac{L\gamma}{g} \frac{dF}{dt} = A\Delta p$$

Щоб визначити постійну часу об'єкта, приведемо диференціальне рівняння до нормального виду:

$$F + \frac{2LAC^2}{F} \left(\frac{dF}{dt} \right) = \frac{2gC^2 A^2 \Delta p}{\gamma F}$$

Коефіцієнт при dF / dt являє собою постійну часу:

$$\tau = \frac{2LAC^2}{F}$$

Коефіцієнт витрати C^2 можна замінити його значенням рівняння усталеного руху:

$$C^2 = \frac{F^2 \gamma}{2gA^2 \Delta p}$$

Тоді постійна часу буде мати вигляд:

$$\tau = \frac{LF\gamma}{gA\Delta p}$$

З викладених міркувань передаточна функція даного об'єкта регулювання представляє собою аперіодичну ланку з ланкою запізнення:

$$W(p) = \frac{e^{-p\tau}}{Tp + 1}$$

Передаточна функція виконавчого механізму:

$$W_{BM} = \frac{K_{BM}}{T_{BM} p + 1};$$

Давача витрати:

$$W_{33} = K_{33};$$

Передаточна функція нормуючого перетворювача дорівнює 1.

Запишемо передаточна функцію по каналу $U-Y$:

$$W(p) = \frac{W_1 W_{BM} W_O}{1 + W_1 W_{BM} W_O W_{33}}.$$

Виділимо передаточну функцію еквівалентного об'єкта керування, будемо мати:

$$W_{EO}(p) = W_{BM} W_O W_{33}.$$

Отримаємо:

$$W_{EO}(p) = \frac{K_{BM} K_{33}}{(T_{BM} p + 1)(T_o p + 1)} e^{-\tau \cdot \omega};$$

Амплітудно-частотна характеристика еквівалентного об'єкта керування:

$$A_o(\omega) = \frac{K_{BM} K_o K_{33}}{\sqrt{(T_o^2 \omega^2 + 1)(T_{BM}^2 \omega^2 + 1)}}.$$

Фазово-частотна характеристика еквівалентного об'єкта керування:

$$\varphi_o(\omega) = -(\arctg(T_{BM} \omega) + \arctg(T_o \omega) + \omega \tau).$$

В загальному випадку передаточна функція замкнутої системи по каналу завдання

$$W_{3\varphi_3} = \frac{\varphi(p)}{\varphi_3(p)} = \frac{W_{P.C.}(p)}{1 + W_{P.C.}(p)} = \frac{W_{P.C.}(p)}{W_{X.П.}(p)}$$

передаточна функція характеристичного полінома

$$W_{X.П.}(p) = 1 + W_{P.C.}(p)$$

Амплітудно-фазова характеристика замкнутої системи по каналу завдання

$$W_{P.C.}(j\omega) = \frac{\varphi(j\omega)}{\varphi_3(j\omega)} = \frac{A_{P.C.}(\omega)}{A_{X.П.}(\omega)} e^{-j[f_{P.C.}(\omega) - f_{X.П.}(\omega)]}$$

Такі показники якості, як максимальне відхилення від положення рівноваги та статична похибка регулювання визначаються тільки властивостями передаточної функції замкнутої системи по збурюючій дії і не може внесені в показники якості, які визначаються передаточною функцією замкнутої системи по керуючій дії.

Інші показники якості – мінімум площі процесу регулювання, перерегулювання та аперіодичність процесу регулювання, досить важко однозначно виразити через передаточну функцію замкнутої системи по керуючій дії.

Як показали проведенні дослідження найкращі перехідні процеси по управляючій дії і по збуренню отримуються по показнику коливальності $M=1,6$. При цьому перерегулювання не перевищує 30% і максимальне відхилення параметра регулювання при внутрішніх збуреннях не перевищують 10%.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Безпека життєдіяльності

Безпека життєдіяльності на підприємстві, пов'язаному з експлуатацією та систем охолодження, є надзвичайно важливою і включає такі ключові аспекти:

1. Безпека технологічних процесів

Забезпечення надійної роботи систем охолодження, щоб уникнути перегріву ядерного реактора.

Постійний контроль якості води в системах охолодження, щоб запобігти утворенню відкладень і корозії обладнання.

Використання методів, таких як магнітна активація води, для зниження ризику аварій за рахунок поліпшення характеристик охолоджуючої рідини.

2. Автоматизація і контроль

Впровадження систем автоматичного контролю параметрів процесу з застосуванням мікропроцесорів і мікро-ЕОМ дозволяє своєчасно виявляти відхилення і мінімізувати людський фактор помилок.

Постійна діагностика стану обладнання для виявлення несправностей на ранній стадії.

3. Організаційні заходи

Систематичне навчання персоналу правилам безпеки і правильній експлуатації обладнання.

Розробка та виконання чітких регламентів і процедур роботи, включаючи аварійні інструкції.

Кваліфікована бригада для налаштування і обслуговування складних систем управління.

Зростання масштабів господарської діяльності і кількості великих промислових комплексів, концентрація на них агрегатів і установок великої і надвеликої потужності, використання у виробництві великих кількостей

потенційно небезпечних речовин збільшує вірогідність виникнення техногенних аварій.

Прямий і безпосередній вплив техніки і технології на суспільство являє собою форму зворотного зв'язку в системі «суспільство-техніка-природа». Порушення нормальних умов життєдіяльності людей на об'єкті або території, які викликані аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, епіфіотією, великими пожежами, застосуванням засобів ураження, що привели або можуть привести до людських втрат і матеріальних збитків називають надзвичайною ситуацією.

Ще однією важливою характеристикою надзвичайних ситуацій є масштаби впливу і наслідків, включаючи простір, соціально-екологічні і економічні (людські і матеріальні втрати, деградація екосистем) аспекти. За цією комплексною ознакою можна виділити ще п'ять типів надзвичайних ситуацій: локальні, територіальні, регіональні, державні і глобальні.

4.2 Основи охорони праці

Основна мета заходів щодо охорони праці - ліквідація виробничого травматизму і професійних захворювань. Проведення заходів щодо поліпшення умов праці дає відчутний економічний ефект - підвищується продуктивність праці, знижуються витрати на відновлення втраченої працездатності.

Міри безпеки праці повинні передбачатися при проектуванні, будівництві, виготовленні і впровадженні в дію об'єктів і устаткування. Усі заходи щодо охорони праці проводяться з метою захисту учасників трудового процесу від впливу небезпечних і шкідливих факторів, що характеризують умови його проведення.

Основні небезпечні та шкідливі фактори в цехах водопостачання:

- елементи обладнання що рухається (насосного, механізованим решіток, шкребків, мішалок);
- небезпечний рівень напруги в електричному колі;
- понижена температура повітря в виробничих приміщеннях спорудах;

- підвищена вологість повітря (у відстійниках);
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена запиленість повітря в робочій зоні.

Крім вказаних шкідливих і небезпечних факторів, є небезпека ураження людей електричним струмом, отруєння при роботі з хімічними речовинами. Тому черговий персонал цеху очищення стічних вод отримує спецодяг (костюм, черевики, рукавиці, захисна каска), спецвзуття (чоботи) та індивідуальні засоби захисту по встановлених нормах. В приміщеннях для обслуговуючого персоналу передбачені роздягалки, умивальники, мило, рушники, аптечки. Крім того, на робочому місці повинні бути індивідуальні засоби захисту: захисний фартух, протигаз марки В, БКФ.

Для забезпечення електробезпеки застосовують наступні технічні способи: захисне заземлення, занулення, захисне відключення, ізоляція струмоведучих частин, огорожувальні пристрої, блокування, знаки безпеки попереджувальні плакати, електрозахисні засоби. При роботі в діючих електроустановках користуються основними і додатковими захисними засобами. Основними є ізолюючі захисні засоби, здатні надійно витримувати робочі напруги електроустановки. Це оперативні штанги, струмовимірювальні кліщі, діелектричні рукавички, інструмент з ізолюючими ручками і показниками напруги. Додатковими є ізолюючі захисні засоби, не розраховані на напругу електроустановки, і що самостійно не забезпечують безпеку персоналу. Тому ці засоби застосовують разом з основними у виді додаткового заходу захисту. До них відносяться діелектричні калоші, килимки, а також ізолюючі підставки.

Усі прилади, апарати і пристосування, які застосовуються як захисні засоби, повинні бути тільки заводського виконання, виконані і випробувані відповідно до діючих нормативно-технічних документів.

Технічні заходи по електробезпеці повинні передбачати:

- відключення установки від джерела напруги, зняття запобіжників і інших заходів, що забезпечують неможливість помилкової подачі напруги до місця роботи;

- установку знаків безпеки й огороження струмоведучих частин, що залишаються під напругою, робочих місць і ін.

- забороняється наступати на провідники, які обірвані звисають або лежать на землі чи підлозі.

- при небезпеці виникнення нещасного випадку необхідно прийняти заходи для його попередження:

- зупинити механізм, зняти напругу, відгородити небезпечну зону, вивісити попереджувальні плакати.

При виникненні нещасного випадку варто негайно приступити до надання постраждалому першої лікарської допомоги, повідомити про нещасний випадок керівництво і викликати швидку медичну допомогу.

Варто дотримуватися правил особистої гігієни: не зберігати одяг на робочому місці, не вдягатися і не роздягатися на робочому місці, не їсти на робочому місці.

На ділянках, де ведуться монтажні роботи, не допускається виконання інших робіт і знаходження сторонніх осіб. Не допускається підняття збірних залізобетонних конструкцій, які не мають монтажних петель чи міток, які забезпечують правильне стропування і монтаж. Елементи монтуємих конструкцій під час переміщення утримуються від розкачування і обертання гнучкими відтяжками.

Не допускається перебування людей на елементах конструкцій і обладнання під час їх підймання чи переміщення, а також не допускається знаходження людей під монтажними елементами конструкцій і обладнання до встановлення їх у проектний стан і закріплення. При переміщенні конструкцій чи обладнання відстань між ними і виступаючими частинами змонтованих конструкцій і обладнання має бути: по горизонталі – 1 м, по вертикалі – 0,5 м.

При виконанні монтажних робіт із застосуванням крану КС-8362 дачу команди машиністу про переміщення вантажу дає спеціально призначений працівник.

Усі конструкції опускаються над місцем їх встановлення не більше ніж на 30 см вище їх проектного положення, після чого монтажники виконують їх

встановлення у необхідне положення. При експлуатації вантажопідйомного крану перевіряється стан канатів та їх кріплення.

Санітарно-гігієнічне та побутове обслуговування робітників на будівельному майданчику розробляється із використанням „Вказівок по проектуванню побутових приміщень, пунктів харчування та здравпунктів будівельно-монтажних організацій”.

Будівельні майданчики із кількістю працюючих у найбільш чисельні зміни менше ніж 25 чоловік мають бути обладнані: гардеробними, умивальниками, кімнатою для обігріву, для приймання їжі, туалетом і душовими. Забезпечення іншими видами побутових приміщень вирішується у кожному окремому випадку в залежності від умов праці.

ВИСНОВКИ

Поданий матеріал із математичного моделювання процесів накопутворення спрямований на практичне розв'язання задач з оптимізації роботи оборотних систем водного господарства промислових підприємств. Для кількісної оцінки солевідкладення метод моделювання є найбільш ефективним інструментом, оскільки дозволяє глибоко дослідити механізм процесу, прогнозувати його динаміку та здійснювати спрямоване керування режимами системи.

Розроблені математичні моделі та сам методологічний підхід до їх побудови є універсальними й можуть бути адаптовані для будь-якої схеми оборотного водопостачання.

Отримані теоретичні характеристики параметрів накопутворення у подальшому будуть порівняні з результатами експериментальних досліджень на діючих промислових об'єктах.

Зокрема, у роботі враховано, що технологічне регулювання температури циркуляційної води на вході та виході з конденсаторів реалізується шляхом зміни її витрати — через дроселювання засувкою на трубопроводі відведення нагрітого потоку або за допомогою зміни частоти обертання лопатей осьового насоса на блочній насосній станції (БНС)

Головною метою цього етапу є системна оптимізація функціонування водного господарства промислових підприємств в умовах дефіциту якісної підживлювальної води та жорстких екологічних обмежень щодо скидання стічних вод.

Для розв'язання задач кількісної оцінки та моніторингу ключових параметрів відкладення солей жорсткості метод математичного моделювання визначено як найбільш ефективний і доцільний підхід з-поміж наявних методів дослідження.

Застосування розробленого математичного опису дозволяє не лише детально розкрити глибинний фізико-хімічний механізм фазоутворення на

міжфазній поверхні «рідина — тверде тіло», а й забезпечує високу точність прогнозування поведінки системи за нестационарних режимів роботи.

Це, у свою чергу, відкриває реальні можливості для реалізації алгоритмів спрямованого автоматизованого керування водним режимом оборотного контуру в оптимальному техніко-економічному діапазоні.

Важливою перевагою розроблених математичних моделей та запропонованого методологічного підходу до їх безпосередньої побудови є їхній інваріантний (універсальний) характер. Математичний апарат не прив'язаний до специфіки конкретного промислового об'єкта, тому створені алгоритми розрахунку можуть бути успішно адаптовані та впроваджені для будь-якої технологічної схеми оборотних систем промислового водопостачання, незалежно від їхньої потужності та конфігурації обладнання.

З метою підтвердження адекватності розроблених теоретичних залежностей, отримані якісні та кількісні характеристики параметрів накипоутворення на наступних етапах роботи будуть детально зіставлені та верифіковані з результатами прямих експериментальних досліджень.

Як база для порівняння використовуватимуться натурні дані, зібрані під час моніторингу діючих систем водного господарства промислових підприємств.

Зокрема, під час верифікації моделей обов'язково враховуватиметься динаміка параметрів теплообмінного обладнання. Технологічне регулювання та стабілізація температури циркуляційної води на вході й виході з конденсаторів енергетичних чи технологічних установок здійснюється шляхом оперативного керування її об'ємною витратою.

В умовах сучасного виробництва це реалізується двома основними способами: якісним дроселюванням потоку за допомогою регулювальної засувки з електроприводом, яка встановлюється на магістральному трубопроводі відведення нагрітої циркуляційної води; кількісною зміною продуктивності системи шляхом регулювання частоти обертання лопатей осьового насосного агрегату безпосередньо на береговій чи блочній насосній станції (БНС) із використанням частотно-регульованого привода.

Врахування цих керуючих впливів у загальній математичній моделі дозволить забезпечити максимальну збіжність теоретичних розрахунків із реальними експлуатаційними режимами промислових систем оборотного водопостачання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лев Адольфович Кульський. Основи хімії і технології води. – Київ: Наукова думка, 1991. – 565 с.
2. Лев Адольфович Кульський, Строкач П. П. Технологія очищення природних вод. – Київ: Вища школа, 1986. – 352 с.
3. Доливо-Добровольський Л. Б., Лев Адольфович Кульський, Накорчевська В. Ф. Хімія і мікробіологія води. – Київ: Вища школа, 1971. – 306 с.
4. Погребенник В. Д., Петрук В. Г., Паламар М. І., Походило Є. В., Кватернюк С. М. Системи оперативного контролю інтегральних параметрів водного середовища. Т. 1. Математичне моделювання та принципи побудови систем оперативного контролю. – Вінниця, 2021.
5. Коноваленко І. В. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0 : навч. посіб. / І. В. Коноваленко, П. О. Марущак. – Тернопіль : В. А. Паляниця, 2020 – 320 с. <http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/handle/123456789/4115>
6. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>
7. Капаціла Ю.Б., Савків В.Б. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 60 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48495>
8. Капаціла Ю.Б., Шовкун О.П. Конструкторсько-технологічна практика. Методичні вказівки для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 22 с.
9. Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження частотних характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

- / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – с. 16. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39207>
10. Козбур І.Р., «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>
 11. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1551>
 12. Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісцью. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 21 с.
 13. Моделювання нелінійних систем керування у пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. - 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28057>
 14. Моделювання систем керування в пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. - 23 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28056>
 15. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Multisim. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу

- "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо . - Тернопіль : ТНТУ Імені Івана Пулюя, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26404>
16. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Proteus VSM. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26397>
 17. Методичні вказівки до курсового проектування з курсу "Проектування систем автоматизації" / Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 128 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48646>
 18. Лабораторний практикум з проектування та моделювання роботи електропневматичних схем у середовищі програмного пакету «FluidSIM Pneumatics» з курсу «Технічні засоби автоматизації» / укл. : О.К. Шкодзінський. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 32 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31418>
 19. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка”. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 53 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44635>
 20. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. -26 с.
 21. Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.
 22. Аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи. : Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Теорія автоматичного управління», для здобувачів спеціальності 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

- освітньо-професійних програм «Комп'ютерно-інтегровані системи автоматики та робототехніки», «Комп'ютеризовані системи управління та прикладне програмування». / укл. І.Р. Козбур, В.П. Пісьціо, В.Б. Савків, П.С. Федорів. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. – 67 с
23. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
24. Навчально-методичний посібник до практичних заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» для студентів освітнього ступеня бакалавр усіх спеціальностей та форм навчання / Укладачі : О. Я. Гурик, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин, С. Ю. Мариненко, О. І. Король. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 123 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48496>
25. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
26. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.
27. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.
28. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
29. Буров Є., Митник М. Комп'ютерні мережі. (у 2-х томах). Львів, Магнолія, 2018.

30. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем. Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А. Г. Микитиший, М. М. Митник, О. С. Голотенко, В. В. Карташов. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42625>
31. Конспект лекцій з дисципліни «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» для студентів спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форми здобуття освіти / уклад. І. С. Дідич. // ТНТУ. – 2025. – С. 92. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/50293>
32. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>
33. I. Strutynska, H. Kozbur, L. Dmytrotso, O. Sorokivska, L. Melnyk and R. Grytseliak, "Regarding to the Concept of Small and Medium-Sized Enterprises Digitalization in Ukraine: Problems and Solutions," 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 2021, pp. 276-279, doi: 10.1109/ACIT52158.2021.9548382.
34. Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.
35. Валяшек В.Б. Навчальний посібник з курсу: “ Оптимізаційні методи та моделі “ для спеціальностей “Облік і аудит, Фінанси і кредит, Маркетинг, Економічна кібернетика” / Кривень В.А., Валяшек В.Б., Цимбалюк Л.І., Козбур Г.В. – Тернопіль : видавництво ТНТУ, 2015. – 83 с.
36. Савків В.Б., Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2021. 50 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35172>

37. Kuznietsov P., Biedunkova O., Yaroshchuk O., Pryshchepa A. Optimization of the Anti-Scale Corrective Treatment of Water by Organic Phosphonate. *Science and Innovation*, 2024.
38. Fedin V., Vorobyova V., Skiba M., Trus I. Assessment of the Efficiency of the Stabilization Treatment for Water of Various Mineralization. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2024.
39. Ковтко, А., & Савків, В. (2026). Архітектура автоматизованої системи генерації тестів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 365(3), 346-352. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-48>
40. Аналіз ефективності мутаційного тестування / А. М. Ковтко, Володимир Богданович Савків, Галина Володимирівна Козбур, Ігор Романович Козбур // Матеріали МНТК „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, 28-29 травня 2025 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2025. — С. 195–197. — (Моделювання в наукоємних технологіях. Комп’ютерно-інформаційні технології та системи зв’язку. Історичні аспекти, науковий та світоглядний розвиток спадщини Івана Пулюя).
41. Савків, В. Б., & Ковтко, А. М. (2026). Мутаційне тестування як механізм зворотного зв’язку в автоматизованій системі генерації модульних тестів на основі великих мовних моделей. *Електротехнічні та інформаційні системи*, (109), 278–287. <https://doi.org/10.32782/EIS/2026-109-33>
42. Архітектура автоматизованої системи для генерації модульних тестів на основі штучного інтелекту та мутаційного тестування / А. М. Ковтко, І. Р. Козбур, Володимир Богданович Савків, Галина Володимирівна Козбур // Матеріали XIV МНТКМУС „Актуальні задачі сучасних технологій“, 11-12 грудня 2025. — Т. : ФОП Паляниця В.А., 2025. — С. 278–280. — (Комп’ютерно-інформаційні технології та системи зв’язку).
43. Lin L., Jiang W., Xu X., Xu P. A Critical Review of the Application of Electromagnetic Fields for Scaling Control in Water Systems. *npj Clean Water*, 2020. Ґрунтовний огляд сучасних методів контролю та запобігання накипоутворенню.

44. Hu Y., Chen C., Liu S. State of Art Bio-Materials as Scale Inhibitors in Recirculating Cooling Water System: A Review Article. Water Science & Technology, 2022.
45. Research on Mechanisms and Effects of Microbial Agent Applied in Scaling Control of Circulating Cooling Water. International Biodeterioration & Biodegradation, 2023..
46. Calcium Sulfate Scale Control Technology for Circulating Cooling Water Systems: A Review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2025.