

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри АВП
к.т.н., доцент
_____ Дідик О.К.
«__» _____ 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Система автоматизованого оптимального керування
випарними установками з дослідженням їх ефективності»**

**«The system of automated optimal control of evaporation plants
with a study of their efficiency»**

Виконав здобувач вищої освіти II курсу
групи АК-21 М
151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

_____ Детюк Д.В.
«__» _____ 2022 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент

_____ Плешков С.П.
«__» _____ 2022 р.

Рецензент
к.т.н, професор

_____ Віхрова Л.Г.
«__» _____ 2022 р.

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту
Кафедра автоматизації виробничих процесів
Освітній ступінь магістр
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” 2022 року

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Детюка Даниїла Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Система автоматизованого оптимального керування випарними установками з дослідженням їх ефективності
- Керівник роботи Плешков С.П., канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- Строк подання студентом роботи до захисту 1.12.2022 р.
- Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи 1. Провести аналіз випарних установок, їх призначення та особливості. 2. Розробити математичну модель випарної установки на основі аналізу існуючих моделей та систем керування. 3. Розглянути оптимальне керування статичними режимами роботи випарних установок та розробити узагальнений алгоритм керування. 4. Побудувати системи автоматичного контролю і оптимального керування випарними установками та дослідити їх ефективність. Охорона праці.
- Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Жесан Р.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз випарних установок, їх призначення та особливості	2.09.22	
2.	Аналіз існуючих моделей та систем керування	28.09.2022	
3.	Розробка математичної моделі випарної установки	18.10. 2022	
4.	Розробка узагальненого алгоритму керування	1.11. 2022	
5.	Побудова системи автоматичного контролю і оптимального керування випарними установками	12.11. 2022	
6.	Охорона праці	20.11. 2022	
7.	Оформлення магістерської роботи	25.11.2022	

Дата видачі завдання 01.09.2022 р.

Керівник роботи _____ Плєшков С.П.
« ____ » _____ 2022 р.

Завдання прийнято до виконання

Студент _____ Детюк Д.В.
« ____ » _____ 2022 р.

АНОТАЦІЯ

Метою даної роботи є розробка системи автоматичного регулювання та створення математичних моделей багатофункціонального призначення і алгоритмів оптимального керування з урахуванням нестаціонарності процесу випарювання для створення комп'ютерних систем керування випарними установками, які відповідають сучасним стандартам ресурсо- та енергозбереження.

В магістерській роботі розроблені заходи з охорони праці та цивільного захисту.

ANNOTATION

The purpose of this work is the development of an automatic control system and the creation of multi-purpose mathematical models and optimal control algorithms taking into account the non-stationarity of the evaporation process to create computer control systems for evaporation plants that meet modern resource and energy saving standards.

Measures for labor protection and civil protection were developed in the master's work.

ЗМІСТ

Вступ

1. Аналіз випарних установок як об'єктів математичного моделювання і оптимального керування

1.1. Призначення випарних установок та фізичні основи процесу випарювання

1.2. Особливості випарних установок поверхневого типу

2. Розробка математичної моделі випарної установки

2.1. Матеріальні та теплові розрахунки випарних установок

2.2. Аналіз існуючих математичних моделей випарних установок

2.3. Аналіз існуючих систем керування випарними установками

2.4. Побудова системи оптимального керування випарними установками

2.5. Математичне моделювання парорідинного простору випарного апарата

3. Оптимальне керування статичними режимами роботи випарних установок

3.1. Критерії керування і керуючі змінні

3.2. Керування при заданій кінцевій концентрації розчину

3.3. Керування за критерієм продуктивності за випареною водою

3.4. Керування за критерієм питомої собівартості процесу випарювання

3.5. Узагальнений алгоритм керування

3.6. Алгоритм проектування систем керування випарними установками

4. Системи автоматичного контролю і оптимального керування
випарними установками та дослідження їх ефективності

4.1. Система автоматичного контролю стану теплообмінних
поверхонь випарних апаратів

4.2. Системи оптимального керування статичними
режимами роботи випарних установок

4.3. Системи оптимального керування циклічністю роботи
випарних установок

Висновки

Література

Додатки

Додаток А Охорона праці

ВСТУП

Випарні установки (ВУ) на сьогодні широко використовуються у різних галузях промисловості: хімічній, металургійній, харчовій,

енергетичній, мікробіологічній та ін. У багатьох виробництвах перелічених галузей промисловості такі установки являють собою основну ланку технологічного процесу, яка визначає якість та вартість виготовленої продукції.

Протягом останніх років при створенні новітніх технологій ВУ застосовують задля вирішення нових технічних завдань.

Так, багато підприємств хімічної, вугільної, металургійної, целюлозно-паперової, мікробіологічної, енергетичної та інших галузей промисловості підчас не мають установок для очищення мінералізованих стічних вод. Очищення промислових стічних вод має тепер особливе значення для вирішення екологічних проблем. Незважаючи на широке впровадження оборотного водопостачання та нових маловідходних технологій, об'єм забруднених стічних вод хімічних виробництв залишається досі значним.

Мінералізований розчин утворюється також у системах знешкодження промислових стічних вод, які містять у собі кислоти, луги та органічні сполуки. У розроблених на сьогодні ВУ з метою очищення вод від цих речовин утворюються розчини та шлами, які іноді заборонено скидати в природні джерела, а треба їх знешкоджувати. Зростання обсягів різних виробництв призводить до збільшення кількості мінералізованих стічних вод. Тому підвищується концентрація солей у водоймах і ґрунті, а цим завдається непоправна шкода довкіллю.

Існує зараз багато методів очищення стічних вод, наприклад; водохімічні, біологічні та біохімічні, фізичні, фізико-хімічні та ін. Але в багатьох випадках вони виявляються недостатньо ефективні або зовсім непридатні. На сьогодні перспективним є використання ВУ для концентрування стічних вод з метою подальшого їх очищення та утилізації розчинених речовин.

Особливе значення для розв'язання завдань водопостачання ряду районів країни, у яких вже відчувається нестача прісної води (Донбас, Крим, узбережжя Чорного та Азовського морів та ін.), має створення опріснювальних установок. Але у той же час у цих районах майже не

обмежені джерела солоних вод. У міру подальшого розвитку промисловості та зрошуваного землеробства нестача прісної води, ймовірно, стане ще відчутнішою.

У багатьох районах світу вже зараз успішно експлуатуються опріснювальні установки різних типів. Основний метод опріснення в них – це дистиляція води у ВУ та в установках миттєвого випаровування. Це найпоширеніші та найпотужніші ВУ у порівнянні з установками інших типів. За їх допомогою виробляють 97 % усієї опрісненої води на планеті. Однак вартість процесів опріснення ще дуже висока. Найважливіше завдання – це суттєве зниження витрат на опріснення води в дистиляційних установках, можна вирішити завдяки підвищенню економічності роботи ВУ.

Створення технічних систем вилучення цінних речовин з морських вод та інших солоних джерел стає дуже важливим для хімічної промисловості та кольорової металургії. Деякі регіони України мають великі водойми, які містять цінну сировину для таких галузей промисловості (Сиваш, лимани, вода морів). Перспективним також є виробництво на базі перероблення цих вод таких цінних речовин, як натрій, бром, йод, магній та ін.

Розвиток виробництва подібних речовин із солоних вод морів та інших джерел стримується, зокрема, відсутністю економічних методів концентрування. Тому потрібно створити ВУ, які б концентрували солоні води без відкладень на поверхнях нагріву за високих енергетичних показників, що певною мірою пов'язане з розвитком техніки випарювання.

Випарні установки споживають значну кількість енергоресурсів, а їх спорудження й експлуатація потребують значних капітальних й виробничих затрат. Тому велике значення мають проектування ВУ з високими техніко-економічними показниками, раціоналізація й оптимізація режимів їх роботи у процесі експлуатації.

Розв'язання таких завдань пов'язане із впровадженням комп'ютерних систем, які відповідають сучасним стандартам ресурсо- та енергозбереження. Основа таких систем – математичні моделі й алгоритми

оптимального керування багатофункціонального призначення, які можна використовувати як на етапі проектування ВУ, так і в умовах їх експлуатації у складі автоматизованої системи керування.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВИПАРНИХ УСТАНОВОК ЯК ОБ'ЄКТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

1.1. Призначення випарних установок та фізичні основи процесу випарювання

Широке застосування одно- та багатокорпусних ВУ, які є невід'ємною складовою різних технологій, пояснюється їх високою економічністю.

Процес випарювання використовують у різних галузях промисловості для вирішення наступних основних завдань:

- концентрування розчинів;
- очищення промислових мінералізованих стічних вод;
- опріснювання води;
- вилучення цінних речовин із морських вод або інших солоних джерел.

Фізична сутність процесу випаровування полягає у перетворенні частини рідини (розчинника) на пару в разі згущення розчинів або у перетворенні всієї рідини на пару в разі випарювання однокомпонентної рідини. При цьому слід відрізняти випарювання від випаровування. Останнє відбувається з поверхні за будь-якої температури, а випарювання – з усієї маси рідини за температури, що відповідає точці кипіння при певному тиску.

З точки зору молекулярно-кінетичної теорії у разі випарювання та випаровування з простору, що займає рідина, видаляється частина молекул речовини, які знаходяться в тепловому русі. Такі молекули заповнюють паровий простір й утворюють насичену пару цієї рідини. Одна частина молекул повертається до рідини, інша водночас випаровується, поповнюючи спад у паровому просторі (тобто встановлюється рухома рівновага, внаслідок чого кількість молекул над рідиною, а отже, і тиск насиченої пари, набувають певного значення за певної температури).

У разі зміни температури кипіння рівновага порушується, це зумовлює відповідну зміну густини та тиску пари. У процесі кипіння перетворення рідини на пару відбувається не лише з поверхні, а й у середині парових пухирців, які утворюються в самій рідині, такий процес тут є основним. Утворені пухирці при цьому самі стають центрами пароутворення. Розмір пухирця пари у міру випаровування в нього рідини збільшується, зростає також його підйомна сила. Тому, переборюючи опір з боку рідини,

пухирець спливає на поверхню, де й лопається, а замість нього утворюється новий пухирець. Таке просування пухирців з нижніх шарів рідини до її поверхні зумовлює неперервне перенесення пари, що утворюється всередині рідини, у паровий простір.

Парові пухирці зароджуються на стінках теплообмінної поверхні при наявності шорсткості. Їх утворенню сприяють також гази, які містяться в рідині та виділяються під час нагрівання й утворюють велику кількість газових пухирців, у які й випаровується рідина.

Умовою утворення парових пухирців є те, що тиск пари всередині пухирця дорівнює зовнішньому тиску оточуючої його рідини. При цьому процес пароутворення відбувається настільки інтенсивно, що, незважаючи на підведення ззовні значної кількості теплоти, температура рідини при цьому не підвищується.

При наявності розчинених газів випаровування відбувається в основному у газові пухирці, які виділяються з рідини у процесі її нагрівання. Тому дія поверхневого натягу майже не відображається на процесі кипіння рідини, її перегрівання при цьому незначне.

Теплоносієм під час випарювання найчастіше виступає насичена або злегка перегріта пара; може застосовуватись також газове або електричне обігрівання, також обігрівання високотемпературним теплоносієм. З метою реалізації процесу випарювання, теплоту від теплоносія слід передати киплячій рідині. Таке можливе лише за різниці температур теплоносіїв (так званого температурного перепаду). Витрата теплоти на випарювання при цьому залежить від прихованої теплоти пароутворення речовини, яка перетворюється на пару.

Під час процесу випарювання температура рідини залишається сталою, так як з моменту початку кипіння теплота витрачається лише на зміну агрегатного стану, тобто на перетворення частинок рідини на пару. Температура кипіння рідини є функцією тиску: з підвищенням тиску вона зростає і, навпаки, у разі вакууму – знижується. Таку обставину використовують найчастіше в процесі випарювання розчинів, для яких з

метою уникнення знешкодження продукту не припускається висока температура кипіння.

Випарювання розчинів відрізняється від кипіння однокомпонентної рідини (наприклад, води) тим, що розчини киплять за більш високої температури, ніж розчинники, за однакового тиску. Це треба враховувати під час розрахунку та проектування ВУ, особливо в разі вибору параметрів теплоносія та робочого режиму в процесі експлуатації.

1.2. Особливості випарних установок поверхневого типу

За класифікації ВУ існують три принципово різні типи ВУ: поверхневі, контактні та установки адіабатного розширення.

У різних галузях промисловості здебільшого застосовують ВУ поверхневого типу, а тому надалі розглядатимемо лише такі установки.

Вони складаються звичайно з трубчастих ВУ та забезпечують випарювання розчинів за відносно невисокої питомої витрати теплоти q , її визначають здебільшого кількістю n ступенів випарювання:

- якщо $n=20$, то $q \approx 150$ кДж/кг випареної води;
- якщо $n=10$, то $q \approx 300$ кДж/кг;
- в одноступеневих установках $q \approx 2800$ кДж/кг.

Коефіцієнти теплопередачі у процесі випарювання розчинів низької концентрації можуть досягати $4000...5000$ Вт/(м²·°C), а у процесі випарювання висококонцентрованих в'язких розчинів – $300...600$ Вт/(м²·°C).

Ступінь концентрування розчинів у ВУ такого типу обмежений відкладеннями, що випадають на поверхнях теплообміну, суттєво знижуючи їх продуктивність.

Конструкції ВУ такого типу дають змогу створити промислові установки продуктивністю $0,1...3000$ т/год за випареною водою.

ВУ поділяють на прямої, мішаної течії та протитечійні.

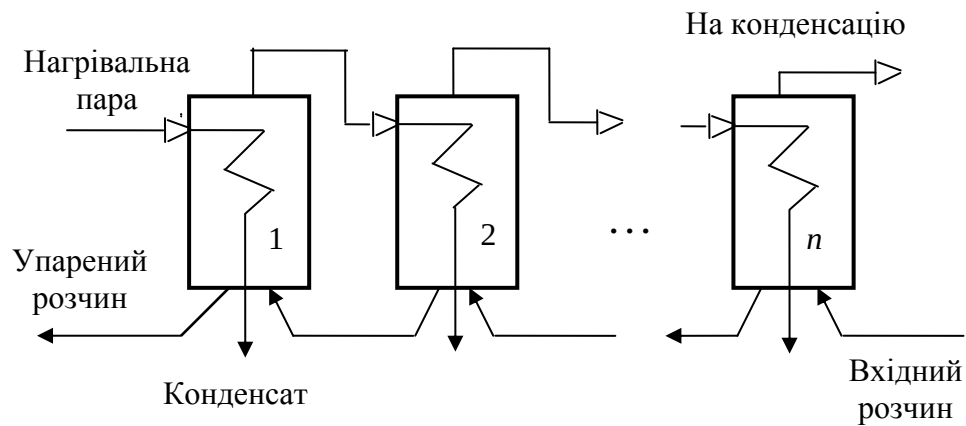


Рис. 1.2. Схема протитечійної ВУ

Схеми ВУ мішаної течії (рис.1.3) складаються із 6–9 корпусів. Вони мають такі самі переваги та недоліки, що і перші два типи ВУ.

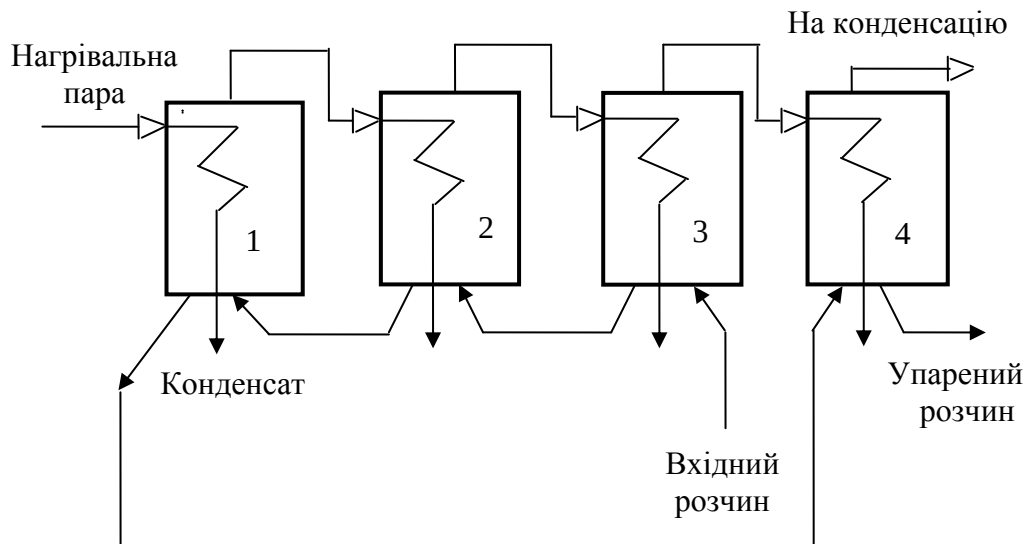


Рис. 1.3. Схема ВУ мішаної течії

Такі ВУ широко застосовують у целюлозно-паперовій промисловості.

Основний техніко-економічний показник роботи ВУ – їх продуктивність. Її визначають за багатьма чинниками як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації.

Під час проектування ВУ продуктивність визначають:

- кількістю ступенів (корпусів) випарювання;
- розміром і конструкцією ВА і конденсаторів;

- наявністю та режимом роботи попередніх і проміжних підігрівників;
- наявністю та кількістю відбору екстрапари;
- схемою ввімкнення ВА;
- розрахунковою корисною різницею температур та її розподілом за корпусами;
- властивостями випарного розчину (суспензії).

Застосування ВУ дає значну економію нагрівальної пари на одиницю маси випареної води. Витрата нагрівальної пари (у кілограмах) на 1 кг випареної води для різних ВУ в середньому становить [1, 4]: однокорпусної – 1,1; двокорпусної – 0,57; трикорпусної – 0,40; чотирикорпусної – 0,30; п'ятикорпусної – 0,27.

Вторинна пара після кожного корпусу спрямовується на обігрівання наступного корпусу або ж частина її надходить на попереднє або проміжне підігрівання. Як у процесі проектування, так й у процесі експлуатації важливо визначити, з яких корпусів найдоцільніше відбирати екстрапару. Рекомендується відбирати не з перших, а з наступних корпусів, крім останнього. Пара з останнього корпусу повністю подається на конденсатор. Якщо ж випарювання відбувається під тиском, то вторинну пару можна використовувати на потреби поза ВУ.

У протитечійних ВУ доцільно застосовувати підігрівники розчину, які обігріваються вторинною парою тих корпусів, куди потім надходить розчин [3,4]. Таке дає змогу зменшити оптимальну кількість корпусів, що особливо важливо для

установок, що обладнані ВА з природною циркуляцією та винесеною зоною кипіння та мають мінімально допустиме значення корисної різниці температур. Розміри ВА та підігрівників визначають необхідною сумарною площею теплообміну. Як правило, всі ВА вибирають однакових розмірів.

Найпоширеніші за схемою ввімкнення – прямо- та протитечійні ВУ. Вони мають приблизно однакові питомі техніко-економічні показники. Схеми ВУ бувають як із мішаним, так й з паралельним живленням.

Схему живлення здебільшого обирають за властивостями випарюваної рідини. Як приклад, в'язкі рідини (чорний луг у целюлозному виробництві) доцільно упарювати в протитечійних ВУ або у ВУ мішаної течії.

Упарювання такої рідини в прямотечійній ВУ призводить до того, що в останньому корпусі, де температура найнижча, забруднюються нагрівальні трубки й тому різко знижується продуктивність ВУ.

Досягнення максимальної продуктивності – це найчастіше основний показник якості роботи ВУ в процесі її експлуатації. На продуктивність установки впливає наступне:

- витрата і параметри нагрівальної пари та охолоджувальної води, яка подається на конденсатор вторинної пари з останнього (за рухом пари) ВА;
- стан поверхонь теплообміну, умови конденсації пари та відведення газів, які не конденсуються;
- витрата і параметри випарюваної рідини;
- час, який витрачається на промивання та чищення поверхонь нагрівання.

Насьогодні ще не розроблено ефективних заходів щодо запобігання утворенню накипу. Захист внутрішніх поверхонь нагрівальних труб фторкаучуком, фторопластом, гумою та іншими матеріалами дає змогу збільшити час роботи ВУ між промиваннями, але водночас такі ВУ економічно поки що себе не виправдали.

Технологічний метод запобігання утворенню накипу станом на зараз полягає у збільшенні швидкості циркуляції розчину, але це одночасно може призвести до переливань рідини з корпусу до корпусу, а це суттєво порушує режим експлуатації ВУ.

Досвід експлуатації ВУ свідчить, що оптимальна тривалість її роботи за інших однакових умов може збільшуватись майже вдвічі. При цьому

закони зміни продуктивності мають як лінійний, так і нелінійний характер (рис. 1.4).

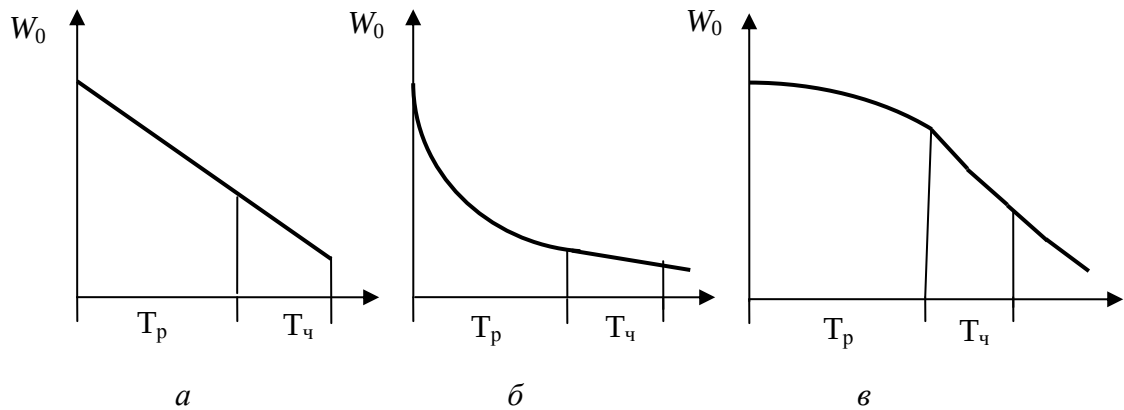


Рис. 1.4. Закони зміни продуктивності ВУ:

a – лінійний; *б, в* – нелінійні

(T_p , T_q – час відповідно роботи та промивання)

Чинниками, які впливають на продуктивність ВУ, вважають відведення газів, які не конденсуються. Гази відводяться неперервно спеціальними пристроями, які передбачені у конструюванні ВА. Як управляючу дію відведення газів, які не конденсуються, як правило, не використовують, так як немає ефективних датчиків контролю наявності таких газів.

Технологічними змінними, які впливають на продуктивність ВУ, виступають також витрата розчину на упарювання та його температура. Зміна витрати розчину не суттєво впливає на температурний режим ВУ й доцільна тільки тоді, коли витрата розчину змінюється згідно зі зміною витрати пари. Температуру вихідного розчину змінюють попереднім підігріванням.

Час, який витрачається на промивання та очищення ВА, залежить від стану поверхонь нагрівання, режиму експлуатації ВУ, а також від організації робіт, які пов'язані безпосередньо з промиванням, очищенням й пусковими режимами. Витрата часу на пусковий режим ВУ значною мірою залежить від майстерності та злагодженості роботи обслуговуючого персоналу та інших чинників.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ

2.1. Матеріальні та теплові розрахунки випарних установок

Проектування ВУ передбачає виконання деяких розрахунків у певній послідовності та логічно пов'язаних між собою, тобто: матеріального, теплового, конструктивного, гідродинамічного, механічного та техніко-економічного [3, 4].

Сутність матеріального розрахунку ВУ полягає у визначенні кількісних співвідношень вхідних продуктів, тобто кількості розчину початкової концентрації, яка подається на ВУ, кількості випареної води, кристалізованої солі та упареного розчину кінцевої концентрації. Крім того, матеріальним розрахунком визначають втрати продукту на проміжних та кінцевій стадіях випарювання.

Задля перевірки правильності матеріальних розрахунків складають матеріальні баланси як для окремих апаратів, так і в цілому для всієї ВУ.

За допомогою теплових розрахунків визначають поверхні нагріву окремих корпусів за певних умов теплового режиму установки або оптимальні режими роботи ВУ із заданими поверхнями нагріву.

Теплові розрахунки ВУ ґрунтуються на використанні рівнянь теплового балансу згідно законів теплообміну для окремих корпусів установки:

$$Q_i = D_i r_i = k_i F_i \Delta t_i,$$

де Q_i – потужність тепла, переданого від нагрівальної пари до випарюваного розчину, Вт;

D_i – кількість пари, що конденсується в нагрівальній камері корпусу, кг;

r_i – питома теплота конденсації, кДж/(кг·°C);

k_i – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·°C);

F_i – площа поверхні теплообміну апарата, м^2 ;

Δt_i – корисна різниця температур, $^{\circ}\text{C}$.

Розраховуючи теплову схему ВУ, звичайно задають: продуктивність ВУ, початкову та кінцеву концентрації розчину, температуру початкового розчину, кількість та параметри, відібрані з кожного корпусу екстрапари для зовнішніх відносно ВУ споживачів, параметри нагрівальної та вторинної пари останнього корпусу та кількість корпусів ВУ.

Мета розрахунку полягає у визначення витрати нагрівальної пари, параметрів пари та розчину в окремих корпусах ВУ, розмірів поверхні нагріву окремих ВА, кількості відібраної екстрапари з кожного ВА для підігрівання розчину початкової концентрації.

Розрахунок теплової схеми полягає в спільному розв'язанні рівнянь матеріального та теплового балансів окремих корпусів ВУ. Оскільки, як правило, кількість невідомих у системі рівнянь матеріального та теплового балансів ВУ перевищує кількість незалежних рівнянь, то розрахунок виконують методом послідовних наближень.

Складність розрахунку ВУ полягає в розподілі загальної корисної різниці температур між окремими ВА.

В основі розрахунку лежить рівняння теплового балансу

$$W_i = D_i \alpha_i + (S_0 c_0 - \sum W_i) \beta_i, \quad (2.1)$$

де W_i – кількість вторинної пари;

D_i – витрата нагрівальної пари;

α_i – коефіцієнт випаровування;

S_0, c_0 – витрата розчину та питома теплоємність на вході в установку;

β_i – коефіцієнт самовипаровування.

Рівняння (2.1) отримано за певних припущень: втрати тепла в навколишнє середовище дорівнюють нулю, теплоємність розчину – лінійна функція температури.

Для розрахунку за цим методом потрібно наперед задати температурний режим установки, який зазвичай заздалегідь невідомий і

потребує для свого визначення завдання витрат нагрівальної та вторинної пари. Це істотний недолік методу, який є наслідком того, що система рівнянь теплового та матеріального балансів не повна у розрахунках ВУ; для її замикання треба залучити рівняння теплопередачі для всіх апаратів та інші подібні рівняння.

Наступний етап розрахунку ВУ – знаходження відповідних коефіцієнтів теплопередачі в апаратах, які для заданого стану і матеріалу поверхні нагріву, режиму циркуляції розчину визначають питомим тепловим потоком й фізичними властивостями рідини. Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі у процесі конденсації пари α_1 і кипіння рідин α_2 виконують на основі так званих критеріальних рівнянь, які отримані обробленням експериментальних досліджень методами теорії подібності. Для розрахунків за цими рівняннями слід наперед визначити питомий тепловий потік, температурний режим й концентрацію рідини, тобто невідомі величини, які самі, в свою чергу, підлягають визначенню на основі розрахунку.

В окремих випадках температурний режим наперед задають за умови забезпечення споживачів парою необхідного потенціалу. Отримані формули дозволяють розрахувати температурний режим установки, якщо при цьому відомі величини теплових навантажень апаратів й коефіцієнтів теплопередачі, тобто величин, які неможливо визначити без знання температурного режиму.

Сучасні методи розрахунку ВУ ґрунтуються на використанні комп'ютерної техніки та стандартних математичних пакетів обробки інформації.

2.2. Аналіз існуючих математичних моделей випарних установок

Перші роботи з математичного моделювання процесу випарювання пов'язані з дослідженням окремих процесів, які протікають у ВА: кипінням рідини, концентрацією пари, тепловіддачею від нагрівальної

пари до киплячої рідини, процесами в паровому просторі нагрівальної камери та сепаратора ВА.

Подальший розвиток математичного моделювання процесу випарювання відображено в розробці математичних моделей ВУ, які призначені для дослідження статичних й динамічних характеристик установки в цілому.

Рівняння матеріального балансу для нагрівальної камери:

$$\frac{d(G_1 + G_2)}{d\tau} = D_1 - D_k - D'_1, \quad (2.2)$$

де G_1 – маса пари у нагрівальній камері;

G_2 – маса плівки конденсату на поверхні нагріву;

D_1 – витрата нагрівальної пари;

D_k – витрата конденсату;

D'_1 – витрата пари на відведення газів, що не конденсуються.

Рівняння для температури поверхні нагріву ВА знаходиться в результаті запису рівняння теплового балансу для кип'ятильних труб:

$$c_m G_3 \frac{\partial t_c}{\partial \tau} = Q_1 - Q_2, \quad (2.3)$$

де G_3 – маса металу труб;

t_c – температура поверхні нагріву;

Q_1 – кількість тепла, яке передається трубам від нагрівальної пари;

Q_2 – кількість тепла, що передається трубами киплячій рідині.

Динаміка зміни концентрації у ВА описується наступним рівнянням

$$f_1 \frac{db}{d\tau} = -(S_0 - W)b + S_0 b_0, \quad (2.4)$$

де b – концентрація розчину в апараті; b_0 , S_0 – концентрація і витрата розчину на вході в перший апарат; f_1 – коефіцієнт рівняння.

Рівень рідини у ВА змінюється згідно виразу

$$e_1 \frac{dh}{d\tau} = S_0 - S_1 - W, \quad (2.5)$$

де h – рівень рідини в апараті;

S_1 – витрата рідини на виході з апарата;

e_1 – коефіцієнт рівняння.

Таким чином отримали систему диференціальних рівнянь, які описують усталені та перехідні процеси ВА.

2.3. Аналіз існуючих систем керування випарними установками

Установки без паровідбору за невеликої кількості апаратів у достатній мірі регулюються за допомогою систем стабілізації параметрів: температури (тиску) пари у нагрівальній камері першого апарату, рівнів за корпусами установки, концентрації готового продукту. Прикладом виступає система стабілізації тиску пари у нагрівальній камері 1-го апарату [1], що керує подачею пари в апарат у залежності від температури пари або парорідинної суміші в ньому. Ця система забезпечує сталість температури кипіння у першому апараті та підтримує постійною його продуктивність в умовах утворення накипу. При цьому продуктивність другого та всіх наступних апаратів знижується, так як коефіцієнти теплопередачі зменшуються при накипоутвореннях, при цьому температурний напір цих апаратів зберігається незмінним. Така система автоматичного керування (САК) за утворення накипу у 2-му апараті не може забезпечити постійної продуктивності установки.

Недоліком подібної системи регулювання, яка підтримує сталість температури кипіння у першому апараті, виступає те, що за зниження температури автоматичний регулятор впливає на подачу пари, а це призводить до збільшення температури у нагрівальній камері вище значення, допустимого за умовами запобігання накипу. Окрім того, по мірі утворення накипу у першому апараті цей регулятор збільшує тиск у нагрівальній камері, а це сприяє збільшенню накипоутворення.

Задля запобігання накипоутворень доцільно регулювати температуру поверхні нагріву або температуру пари у нагрівальній камері. Вибір таких параметрів, як імпульс для САК, що регулює подачу пари, доцільний ще й тому, що за каналами регулювання таких температур об'єкт отримує кращі динамічні властивості.

При великому числі трубок у випарному апараті вимірювання температури трубки в одній точці може виявитись неможливим; вимірювання ж у декількох точках ряду труб ускладнене. Оскільки в якості регулювального імпульсу можна використовувати температуру, а при невеликих нагрівах – тиск нагрівальної пари.

Важливим технологічним параметром процесу випарювання, який визначає якість готового продукту виступає концентрація розчину на виході з випарної установки. При експлуатації випарний апарат зазнає різних збурень, які викликають відхилення концентрації від заданої.

Існує декілька способів регулювання концентрації розчину, який виходить з випарного апарату: зміною витрат рідини на вході в апарат або виході з нього, кількості випареної води, а також різними комбінаціями подібних регулювальних впливів. Зміна концентрації розчину в апараті при одному й тому ж збурюючому або регулювальному впливі значно залежить від того, на яку лінію впливає виконавчий орган регулятора рівня: за установки регулятора на лінії виходу розчину з апарату зміна концентрації відбувається з більшою швидкістю, ніж при установці на лінії входу.

Концентрація та рівень рідини у випарному апараті являються взаємозв'язаними параметрами. Будь-який збурюючий або регулювальний вплив (окрім зміни концентрації на вході), що призводить до зміни концентрації розчину в апараті, викликає також зміну рівня рідини в цілому.

При регулюванні концентрації зміною витрати рідини на виході з апарату велике значення має нормальна робота регулятора рівня. Якщо елементи регулятора мають нечутливості та запізнювання, то при впливі

регулятора концентрації на витрати розчину на виході з апарату, концентрація у ньому не змінюється до початку впливу регулятора рівня на приток рідини.

Якщо головною метою регулювання апарату є підтримання постійної концентрації розчину на виході з апарату, то краща якість регулювання отримується, якщо регулювальним впливом є зміна витрати рідини на вхід. Якщо ж потрібне більш якісне регулювання рівня в апараті, то регулювання концентрації необхідно здійснювати зміною витрати на виході, а рівня – на вході.

Одним з найважливіших параметрів регулювання роботи ВУ - це рівень розчину у ВА. Тому у більшості випадків ВА обладнані системами автоматичного регулювання рівня.

Задля покращення якості регулювання ВУ, особливо при значній кількості апаратів, перспективне використання САК, у яких використовуються принципи інваріантності. Для установок з паровідборами збурення за навантаженням користувачів зазвичай мають стохастичний характер. У такому випадку перспективні системи, які самопристосовуються до різних умов роботи.

Відома [5] система оптимального, з точки зору підтримання максимального коефіцієнту тепловіддачі до рідини, а відповідно, і продуктивності ВУ, регулювання рівнів.

В основу роботи такої системи покладена експериментальна залежність коефіцієнта теплопередачі від рівня. Показник ефективності (витрата конденсату) безпосередньо вимірюється витратоміром, і пошук оптимального режиму відбувається на об'єкті.

В апаратах через однакові проміжки часу автоматично на одну й ту ж саму величину змінюють рівні і при цьому слідкують за швидкістю зміни витрати конденсату. Коли при зміні рівня (як приклад, при збільшенні), витрати конденсату збільшуються, тобто швидкість зміни витрати буде більшою від нуля, збільшення рівня продовжують. Коли витрата

конденсату зменшується (як приклад, при збільшенні рівня), приріст рівня проводять у протилежному напрямку тобто рівень зменшують.

Зміну рівня остаточно припиняють, коли швидкість зміни витрати конденсату дорівнюватиме нулю, тобто витрата конденсату та коефіцієнту теплопередачі максимальні. Такий стан й приймають за оптимальний рівень.

За експлуатації ВУ змінюються параметри теплоносія, коефіцієнти теплопередачі, навантаження користувачів, властивості сировини та багато інших факторів, які впливають на технологічний режим процесу випарювання. У таких умовах виникає задача розрахунку та забезпечення оптимального режиму роботи ВУ, за якого досягається екстремальне значення критерію керування, тобто техніко-економічного показника, який визначає ефективність роботи ВУ.

Задача максимізації продуктивності ВУ зазвичай вирішувалась шляхом пошуку умов, за яких можлива передача крізь поверхні нагріву окремих ВА максимальної кількості тепла від нагрівальної пари до випарювального розчину. Створення подібних умов тісно пов'язане з інтенсивністю тепловіддачі й перш за все, - з величиною коефіцієнта тепловіддачі від поверхні нагріву до випарюваного розчину, а це обумовлює необхідність проведеного експериментального дослідження такого складного питання.

2.4. Побудова системи оптимального керування випарними установками

Робота ВУ характеризується багатьма технологічними параметрами, деякі з яких неможливо виміряти з необхідною точністю. У процесі експлуатації установки на неї діють низько- та високочастотні збурення. Суттєвий вплив на роботу ВУ має також процес накипоутворення, який протікає на теплообмінних поверхнях випарних апаратів. Такий процес приводить до того, що установка практично весь час працює у нестационарному режимі. Всі вище названі обставини приводять до того,

що ВУ, як правило, працює у режимі, який вкрай рідко співпадає з розрахованим на етапі проектування.

Враховуючи, що ВУ - енергоємні об'єкти, створення ефективної автоматизованої системи керування ними, яка б забезпечила їх функціонування в оптимальному режимі, є достатньо актуальною задачею.

На рис.2.1. наведені графіки зміни продуктивності ВУ за випареною водою на протязі трьох циклів її роботи. З таких графіків випливає, що така продуктивність на протязі циклу роботи установки невпинно зменшується, це пояснюється накопуванням. Причому закон накопування, який, в свою чергу, залежить від багатьох технологічних параметрів ВУ, не повторюється ні в якому з циклів роботи.

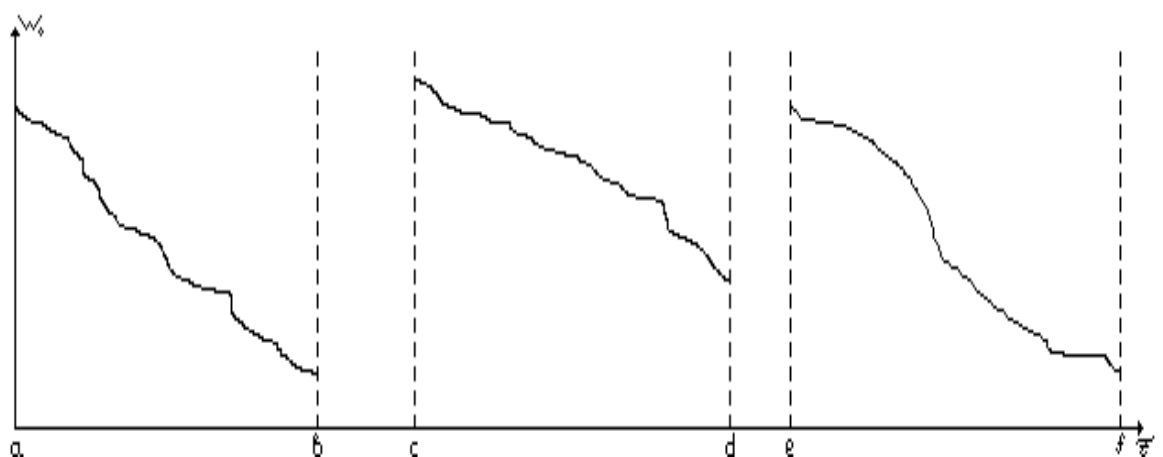


Рис. 2.1. Зміна продуктивності ВУ з часом на різних циклах її роботи.

Тому процес випарювання у ВУ є нестационарним. Нестационарність цього процесу виражається у монотонному зниженні продуктивності установки на протязі одного циклу її роботи (ділянки $a-b$, $c-d$, $e-f$ на рис. 2.1.) й будемо умовно називати нестационарністю 1-го роду.

Така нестационарність приводить до того, що навіть в умовах, коли вхідні змінні стабілізовані, тепловий режим роботи установки змінюється. А це викликає потребу побудови оптимального керування статичними режимами роботи ВУ з урахуванням нестационарності першого роду.

Зниження продуктивності ВУ продовжується до того моменту, коли взагалі функціонування установки у такому режимі стає недоцільним або взагалі неможливим. ВУ зупиняють для проведення чищення та промивання (ділянки b-c, d-e на рис.2.1.). Після проведення профілактичних робіт установка знову включається в роботу. Отже, процес випарювання у ВУ має циклічний характер, причому закон зміни продуктивності установки при цьому на поточному циклі роботи відрізняється як від попередніх циклів, так й від наступних, тому що продуктивність ВУ визначається не тільки станом теплообмінних поверхонь, але й технологічним режимом установок. Оскільки що закон зміни технологічного режиму ВУ у часі практично ніколи не повторюється, то, відповідно, ніколи не повторюється й закон зміни у часі продуктивності установки, тобто черговий цикл роботи ні в чому не повторює попередні. В такому розумінні процес випарювання у ВУ також є нестационарним. Нестационарність такого роду будемо називати нестационарністю другого роду.

За синтезу оптимального керування циклічністю роботи ВУ з урахуванням нестационарності другого роду слід розв'язати наступні задачі: 1) розрахувати оптимальну тривалість робочого періоду у циклі роботи установки; 2) визначити оптимальні значення технологічних змінних, що забезпечують найкращі середньоциклові техніко-економічні показники роботи ВУ.

Необхідно зазначити, що розв'язок другої задачі може суперечити розв'язку задачі оптимізації статичного режиму роботи ВУ, оскільки значення технологічних змінних, що повинні бути реалізовані на об'єкті керування для забезпечення, як приклад, оптимального статичного режиму, можуть не співпадати зі значеннями тих же змінних для забезпечення оптимальних середньоциклових показників. Отже, виникає задача розв'язання таких протиріч.

У будь-якому разі, яка б задача із вище перелічених не розглядалася, кожна з них обумовлює ще одне завдання – розрахований оптимальний

технологічний режим будь що має бути реалізований. І при цьому слід забезпечити оптимальний перехід від попереднього режиму роботи до наступного.

Отже, при побудові загальної системи оптимального керування ВУ виникають наступні основні задачі:

- оптимальне керування циклічністю роботи установки;
- оптимальне керування статичними тепловими режимами роботи ВУ;
- забезпечення оптимального переходу від одного статичного режиму до іншого.

Ці задачі у той або іншій мірі розглядалися у різних працях, аналіз яких наведений вище. Але розглянуті методи розв'язання таких задач не відповідають сучасним вимогам до якості систем керування ВУ. Такі вимоги визначаються тими технічними можливостями, що надають сучасні комп'ютерні системи. Головними з таких вимог можна вважати: 1) розв'язання усіх задач керування ВУ повинно здійснюватись з урахуванням їх взаємозв'язку; 2) загальна система керування ВУ має враховувати нестационарність процесу випарювання першого та другого роду.

Окреслені задачі обумовлюють структуру загальної системи оптимального керування ВУ у вигляді ієрархічної структури, наведеної на рис.2.2.

На нижньому III рівні системи керування розв'язується задача оптимального переходу від одного статичного теплового режиму до іншого або система керування повинна забезпечити перехід від одних значень температур до інших.



Рис.2.2. Структура ієрархічної системи оптимального керування ВУ

На I рівні системи керування розв'язуються задачі оптимального керування ВУ з урахуванням нестационарності другого роду або задачі оптимізації циклічності роботи установки. Розв'язком таких задач має бути тривалість робочого періоду, також оптимальні значення технологічних змінних, що використовуються як управляючі.

Така концепція побудови системи оптимального керування ВУ передбачає розв'язок усіх задач керування установкою при їх взаємозв'язку.

Для створення системи оптимального керування ВУ згідно такої концепції мають бути вирішені наступні основні завдання:

- 1) розробка комплексу математичних моделей, на основі яких можуть бути вирішені задачі усіх трох рівнів керування ВУ;
- 2) побудова математичних моделей технологічного обладнання, що працює у спільному з ВУ технологічному комплексі, з ціллю урахування впливу режимів роботи такого обладнання на роботу ВУ;
- 3) проведення системного аналізу задач моделювання та керування випарними установками різних технологічних схем на множині критеріїв оптимального керування статичними й динамічними режимами їх роботи;
- 4) розробка методології урахування нестационарності процесу випарювання першого та другого роду у загальній системі оптимального керування ВУ;
- 5) створення універсальних алгоритмів оптимального керування статичними режимами та циклічністю роботи ВУ з урахуванням нестационарних властивостей випарних установок;
- 6) дослідження ефективності розробленого математичного й алгоритмічного забезпечення комп'ютерних систем керування випарними установками.

2.5. Математичне моделювання парорідинного простору випарного апарата

Задля математичного опису процесів у парорідинному просторі слід сукупно розглянути рівняння матеріального та теплового балансів. У результаті отримаємо диференціальне рівняння:

$$z_0 \frac{dT_1}{d\tau} = z_1 T_1 + z_2 \theta + z_3 W + z_4, \quad (2.6)$$

де W – витрата випареної вторинної пари; коефіцієнти визначають з таких виразів:

$$z_0 = \rho_p c_p V_p + c_m \sum G_i; \quad (2.7)$$

$$z_1' = g_3 + S_1 c_p; \quad (2.8)$$

$$z_2 = g_3; \quad (2.9)$$

$$z'_3 = i_1;$$

$$z'_4 = S_0 c_0 t_0,$$

де ρ_p – питома густина рідини, кг/м³;

c_p – питома теплоємність рідини кДж/(кг·°С);

V_p – об'єм парорідинного простору, м³;

$\sum G_i$ – маса активного металу, кг;

S_0, S_1 – витрата рідини на вході та виході ВА, кг/с;

i_1 – питома ентальпія вторинної пари, кДж/кг;

t_0 – температура рідини на вході у ВА, °С.

У такому виді рівняння (2.6) не можна використовувати для аналізу та синтезу систем керування з деяких причин. По-перше, майже всі коефіцієнти такого рівняння залежать від температурного режиму в апараті. По-друге, це рівняння не містить у чистому вигляді вихідної змінної S_0 . По-третє, у цьому рівнянні з'являється ще одна невідома змінна W , яка теж, в свою чергу, залежить від теплового режиму ВА. Отже, рівняння (2.6) потребує перетворень.

У разі сталого рівня рідини у ВА (а це звичайно забезпечується завжди або конструкцією самого апарата або системою керування) витрати випареної води W можна вважати пропорційними кількості тепла, що передане від нагрівальної камери. Математично це відбивається рівнянням

$$W = z'_5(T_1 - T_0), \quad (2.10)$$

де $z'_5 = g_3/r$ (r – питома теплота пароутворення).

У коефіцієнті z'_1 (2.6) введемо заміну $S_1 = S_0 - W$, тоді

$$z'_1 = g_3 + c_p S_0 - c_p z'_5 T_1 + c_p z'_5 T_0. \quad (2.11)$$

Підставляючи вирази (2.10) та (2.11) у рівняння (2.6), дістаємо

$$z_0 \frac{dT_1}{d\tau} = z_1 T_1 (T_1 - T_0) + z_2 \theta + z_3 T_1 + z_4 T_0 + z_5 S_0, \quad (2.12)$$

де

$$z_1 = -c_p z'_5; \quad (2.13)$$

$$z_3 = g_3 + i_1 z'_5 + c_p S_0; \quad (2.14)$$

$$z_4 = -i_1 z'_5; \quad (2.15)$$

$$z_5 = c_0 t_0. \quad (2.16)$$

2.6. Математична модель випарного апарата та її дослідження

Динаміка теплового режиму ВА описується диференціальними рівняннями разом з алгебричними.

Враховуючи суттєву різницю в інерційності процесів зміни температури у ВА та концентрації абсолютно сухих речовин (а.с.р.) [6], а також те, що концентрація а.с.р. у ВА передусім залежить від температури, під час моделювання динамічних режимів ВА основну увагу приділяють тепловим режимам, вважаючи при цьому режими зміни концентрації а.с.р. у ВА квазістатичними.

А отже, динаміку зміни температури у ВА можна описати системою:

$$\begin{aligned} a_0 \frac{dT_0}{d\tau} &= a_1 T_0 + a_2 \theta + a_3 D_0; \\ a'_0 \frac{dP_0}{d\tau} &= a'_1 P_0 + a'_2 \theta + a'_3 D_0 + a'_4; \\ g_0 \frac{d\theta}{d\tau} &= g_1 \theta + g_2 T_0 + g_3 T_1; \\ z_0 \frac{dT_1}{d\tau} &= z_1 T_1 (T_1 - T_0) + z_2 \theta + z_3 T_1 + z_4 T_0 + z_5 S_0. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Складність подальшого використання такої системи полягає в тому, що майже всі її коефіцієнти виступають функціями теплового режиму ВА, й отже, така модель являє собою систему нелінійних диференціальних рівнянь, розв'язання якої створює певні проблеми.

Задля спрощення математичної моделі проаналізуємо залежність її коефіцієнтів від теплового режиму ВА. При цьому слід пам'ятати, що на

діючій ВУ реальні зміни температури в окремому ВА не можуть перевищувати ± 5 С.

Розглянемо спочатку коефіцієнт a_0 , який описує процеси змінювання температури в нагрівальній камері ВА. Він характеризує інерційність ВА за температурою пари в нагрівальній камері.

Припустимо, що об'єми пари в нагрівальній камері та нагрівальної камери однакові, тобто об'єм плівки конденсату V_k незначний (майже дорівнює нулю), рівняння можна записати у виді

$$a_0 = V_0 \left[\rho_0 \frac{\partial u_0}{\partial T_0} + (u_0 - i_k) \frac{\partial \rho}{\partial T_0} \right] + c_m G_m + 0,5 \cdot c_i G_i.$$

Оскільки нам цікава тільки зміна коефіцієнту Δa_0 в залежності від температури T_0 , а не саме значення a_0 , а також й те, що зі зміною температури у нагрівальній камері у діапазоні ± 5 С значення c_m , G_m , c_i та G_i залишаються майже сталими, отримаємо:

$$\Delta a_0 = V_0 \left[\rho_0 \frac{\partial u_0}{\partial T_0} + (u_0 - i_k) \frac{\partial \rho_0}{\partial T_0} \right].$$

Результати дослідження зміни коефіцієнта a_0 у різних режимах роботи ВА за умови зміни температури ΔT_0 у нагрівальній камері в зазначеному діапазоні відносно регламентного значення T_0 наведено на рис.2.3.

Як випливає з рисунка, зміна коефіцієнта a_0 тим більша, чим вищий температурний режим роботи ВА. Але й у «найгіршому» випадку при $T_0=150$ С максимальна відносна похибка становить 8%, а це не суттєво для виконання інженерних розрахунків. Отже, коефіцієнт a_0 надалі будемо вважати сталим для робочого діапазону зміни температури у ВА.

Коефіцієнти a_1 , a_2 розраховуємо за формулою (2.3) [4].

У виразі (2.3) [4] значення δ_c та F_k не залежні від температури. Зі зміною температури в робочому діапазоні залишається майже сталою й величина λ_c . Отже, коефіцієнт $a_2 = -a_1$ визначаємо за коефіцієнтом тепловіддачі під час конденсації пари α_1 . Розрахунки, приведені у [4], показують, що зі зміною температурного напору в межах $\pm 10\%$ коефіцієнт

α_1 змінюється не суттєво, тобто в першому наближенні можна обрати $\alpha_1 = \text{const}$, а, значить, і $a_2 = -a_1 = \text{const}$.

Коефіцієнт a_3 визначається за формулою (2.4) [4]. Його теж можна вважати сталим, це підтверджують результати дослідження (рис.2.4). Дослідження проводилися для діапазону температур ± 10 С, це вдвічі перевищує робочий діапазон. При цьому максимальна робоча похибка становить 3,5%.

Розглянемо тепер коефіцієнти рівняння динаміки тиску в нагрівальній камері ВА. Такі коефіцієнти розраховуємо за формулами (2.13)–(2.16).

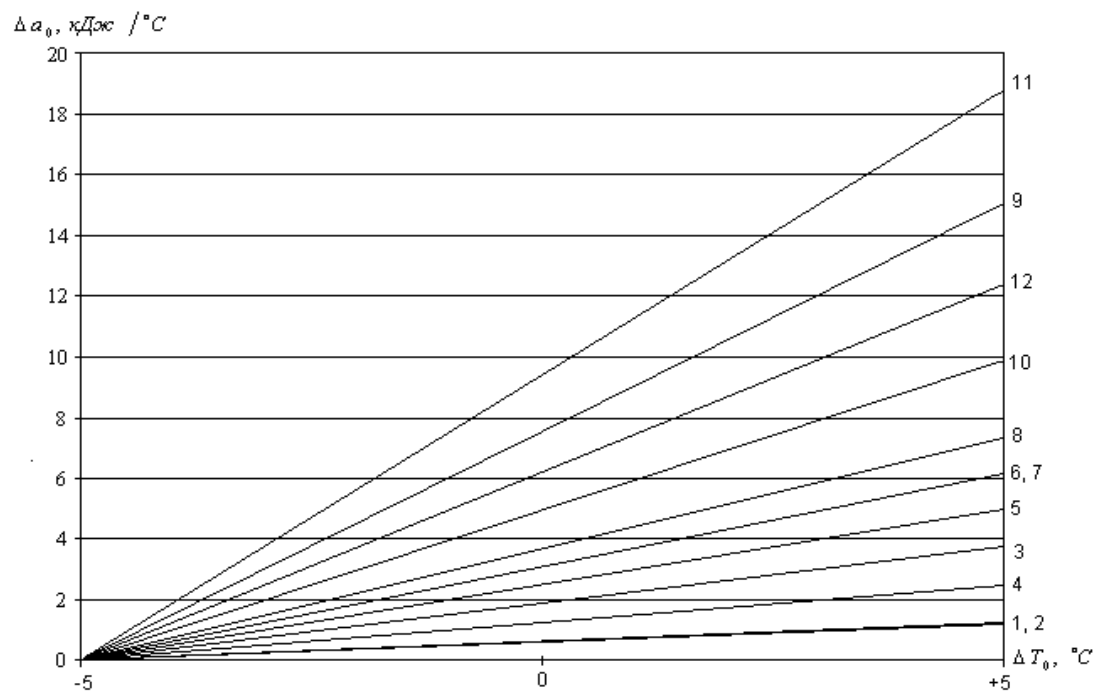


Рис. 2.3. Залежність зміни $\Delta \alpha_0$ коефіцієнта α_0 від температурного режиму у нагрівальній камері ВА:

1– $T_0=50^\circ\text{C}$; 2– $T_0=60^\circ\text{C}$; 3– $T_0=70^\circ\text{C}$; 4– $T_0=80^\circ\text{C}$; 5– $T_0=90^\circ\text{C}$;
 6– $T_0=100^\circ\text{C}$; 7– $T_0=110^\circ\text{C}$; 8– $T_0=120^\circ\text{C}$; 9– $T_0=130^\circ\text{C}$; 10– $T_0=140^\circ\text{C}$;
 11– $T_0=150^\circ\text{C}$; 12– $T_0=160^\circ\text{C}$

Посилаючись на наведені вище дослідження коефіцієнтів α_1 та α_3 , можна стверджувати, що в робочому діапазоні температур ВА коефіцієнти α'_3 та α'_4 будуть мати сталі значення.

Для аналізу розглянемо спочатку похідну $\frac{\partial T_0}{\partial P_0}$. Використовуючи дані [3], залежність температури T_0 сухої насиченої пари від її тиску P_0 у нагрівальній камері ВА для діапазону температур ± 10 С можна апроксимувати лінійною функцією

$$T_0 = \alpha_0 + \beta_0 P_0, \quad (2.18)$$

де α_0 та β_0 – сталі коефіцієнти.

Значення коефіцієнтів α_0 і β_0 для різних температурних діапазонів і середньоквадратичну похибку апроксимації σ приведено в табл. 2.1.

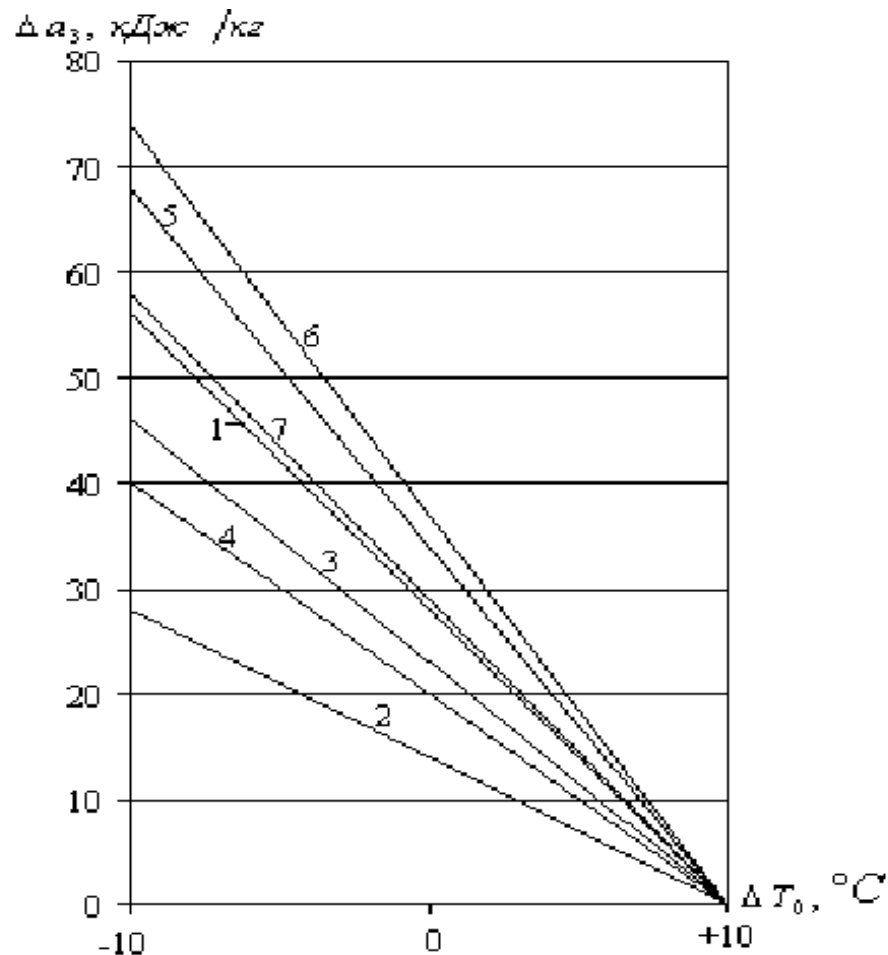


Рис. 2.4. Залежність зміни Δa_3 коефіцієнта a_3 від температури T_0 нагрівальної камери ВА:

1– $T_0=50$ °С; 2– $T_0=70$ °С; 3– $T_0=90$ °С; 4– $T_0=110$ °С; 5– $T_0=130$ °С;
6– $T_0=150$ °С; 7– $T_0=170$ °С

Значення коефіцієнтів α_0 і β_0 в апроксимуючому виразі (2.18) та середньоквадратичної похибки апроксимації σ у залежності від температури

Параметр апроксимації	Температурні діапазони, °C					
	60...80	80...100	100...120	120...140	140...160	160...180
α_0	46,17	63,00	79,60	95,96	112,09	124,59
$\beta_0 \cdot 10^{-4}$	7,4	3,7	2,1	1,2	0,8	0,6
σ	2,25	1,71	1,31	1,03	0,79	0,04

Значення середньоквадратичної похибки σ свідчать про достатню точність апроксимації. Тоді похідну $\frac{\partial T_0}{\partial P_0}$ для різних температурних діапазонів можна вважати сталою величиною, яка дорівнює β_0 . Тому можна записати

$$a'_0 = a_0 \beta_0;$$

$$a'_2 = -a'_1 = a_2 \beta_0,$$

що означає можливість вважати сталими всі коефіцієнти рівняння (2.17).

РОЗДІЛ 3

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИМИ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ВИПАРНИХ УСТАНОВОК

За синтезу оптимального керування певним технологічним об'єктом, у тому числі ВУ, основними питаннями з позицій системного підходу виступають:

- формулювання критерію керування;
- формування загальної задачі керування;
- визначення реальних управляючих змінних, за допомогою яких визначений за моделлю оптимальний технологічний режим буде реалізований;
- побудова математичної моделі, за якою даний критерій буде розраховуватись.

У зв'язку з цим слід провести системний аналіз задач моделювання та керування випарними установками різних технологічних схем.

3.1. Критерії керування та керуючі змінні

Різноманітність типів ВУ, їх призначень й умов експлуатації зумовлює можливість застосування цілого ряду техніко-економічних показників у

якості критеріїв управління статичними режимами їх роботи. Розглянемо такі показники.

Продуктивність ВУ - найважливіший показник режиму її роботи. Він, як правило, входить до всіх видів критеріїв керування й може служити самостійним критерієм.

У якості самостійного критерію управління продуктивність ВУ звичайно

застосовують у наступних випадках:

- якщо з метою оптимізації використовують способи, при яких продуктивність ВУ зростає, а решта економічних показників (якість готового продукту, питомі енерго- та трудовитрати) не погіршуються;

- якщо ВУ, які входять до складу технологічного комплексу, є „вузьким” місцем виробництва й тому в інтересах підвищення ефективності роботи всього комплексу ставиться однозначна задача отримання максимальної продуктивності установки незалежно від зміни інших її економічних показників або за їх обмежень.

Питома собівартість випарювання у загальному виді визначається залежністю

$$C_B = \frac{Q_E}{W_0},$$

(3.1)

де Q_E - експлуатаційні витрати на ведення процесу випарювання за одиницю часу;

W_0 - продуктивність ВУ за випареною водою.

Експлуатаційні витрати визначаються енерго- N і трудовитратами L на ведення процесу випарювання за одиницю часу роботи ВУ:

$$Q_E = N + L.$$

Енерговитрати

$$N = a_1 D_0 + a_2 D_B + a_3 D_E,$$

де D_0, D_B, D_E - витрата відповідно нагрівальної пари, охолоджувальної води та електроенергії за одиницю часу;

a_1, a_2, a_3 - вартість одиниці витрати пари, води та електроенергії відповідно.

Трудовитрати на ведення процесу випарювання визначимо наступним чином

$$L = L_1 + L_2 + L_3,$$

де L_1 - прямі трудовитрати, віднесені до одиниці часу роботи ВУ;

L_2 - цехові витрати (зарплатня цехового персоналу, амортизаційні відрахування, утримання виробничих приміщень, тощо), віднесені до одиниці

часу роботи ВУ;

L_3 - загальнозаводські витрати (зарплатня загальнозаводського персоналу, утримання заводських лабораторій, тощо), віднесені до одиниці часу роботи ВУ.

Враховуючи, що трудовитрати та витрата електроенергії в одиницю часу є практично сталими величинами, які не залежать від режиму роботи ВУ, у разі оптимізації статичного режиму установки як критерій управління слід застосовувати змінну складову питомої собівартості ведення процесу випарювання:

$$C = \frac{a_1 D_0 + a_2 D_B}{W_0}.$$

(3.2)

Собівартість випарювання одиниці маси води в якості критерію управління дає змогу одночасно враховувати ряд важливих економічних показників виробництва. Такий критерій застосовують тоді, коли оптимальна за критерієм продуктивність ВУ є не меншою за продуктивність, необхідну для своєчасної якісної та повної переробки всієї кількості початкової сировини, яка надходить.

Питома собівартість упареного продукту складається з вартості експлуатаційних витрат й початкової сировини:

$$C_P = \frac{Q_E + V_0 S_0}{S_K} \quad (3.3)$$

де S_0, S_K - витрати упарюваного і упареного розчину відповідно;

V_0 - ціна сировини.

Характерною особливістю такого критерію управління є штучне зменшення складової, яка визначається питомими експлуатаційними показниками W_0, D_0, D_B та ін. таке відбувається тоді, коли ціна сировини стала або її зміна не пов'язана зі зміною експлуатаційних показників і режиму виробництва. Тому критерій собівартості продукції на відміну від критерію собівартості випарювання слід застосовувати задля оцінювання ефективності роботи ВУ за умов зміни собівартості сировини, яка пов'язана зі зміною її якості.

Прибуток виробництва упареного розчину – це найбільш загальний показник ефективності роботи ВУ:

$$P = V_K S_K - V_0 S_0 - Q_E, \quad (3.4)$$

де V_K - ціна упареного продукту.

Прибуток виробництва включає у себе вартість експлуатаційних витрат Q_E , собівартість сировини та готового продукту, які віднесені до одиниці часу роботи установки.

Значну частину ВУ застосовують задля виробництва продуктів, якість яких певною мірою залежить від режиму роботи установки. До якості продукту, окрім його концентрації, належать хімічний склад, запах, смак, колір, наявність вітамінів, консистенція, лікарські властивості, та ін.

У разі концентрування розчинів, зазвичай, вимагається максимальне збереження основних властивостей сухих речовин сировини, а у разі опріснювання солоних вод – чистота виділеного розчинника.

Розглянуті вище критерії управління у такому вигляді не враховують жодних показників якості продукту, що випарюється. Тому у разі вибору

режиму роботи ВУ при необхідності слід вводити обмеження режимних змінних з урахуванням якості продукту та припустимого режиму роботи обладнання.

Розрахований оптимальний статичний режим роботи може бути реалізований на ВУ шляхом завдання значень певних технологічних змінних рівними тим значенням, які відповідають обчисленому оптимуму. У подальшому такі технологічні змінні будемо називати управляючими змінними. Їх правильний вибір – це задача, яка не поступається за складністю та важливістю задачі вибору критерію керування. Однією з основних вимог, що ставляться при виборі керуючих змінних, є їх незалежність.

Іноді в якості управляючої змінної використовують температуру у нагрівальній камері 1-ого ВА, вважаючи її незалежною. Проте це не скільки у зв'язку з тим, що вона є функцією витрати нагрівальної пари та температури поверхні нагрівання.

Витрату нагрівальної пари на установку також не можна розглядати як незалежну, так як її значення може змінюватись навіть при незмінному положенні регулювального органа, який управляє цією витратою, за умови зміни температурного режиму до або після регулювального клапана. Незалежною управляючою змінною можна вважати рух регулювального органа, який встановлений на лінії витрати пари. Як неведено у розділі 2, положення регулювального органа визначається сигналом μ , який надходить від відповідного регулятора. Отже, в якості керуючої змінної слід розглядати не саму витрату нагрівальної пари, а сигнал μ_0 , який надходить від відповідного регулятора.

Якщо ВУ має відбори екстрапари, як управляючі змінні розглядають сигнали μ_i ($i = 1, 2, \dots, m$; m - кількість паровідборів) регуляторів, які керують відповідними паровідборами.

Водночас на рівні з зазначеними змінними для управління статичним режимом роботи ВУ може використовуватись також витрата

охолоджувальної води на конденсацію вторинної пари. Але збільшення такої витрати вище певної величини, що є максимально доцільною для даної ВУ, не приводить до подальшого підвищення продуктивності установки за випареною водою. Окрім того, за умови зменшення такої витрати задля підтримки продуктивності ВУ за випареною водою слід відповідно збільшувати витрату нагрівальної пари, а це, по-перше, недоцільно з економічної точки зору, а, по-друге, приводить до інтенсифікації процесу накипоутворення, а це, у свою чергу, погіршує середньоциклові показники роботи всієї установки. Тому, зазвичай, на практиці вузол конденсації ВУ споживає максимально доцільну витрату охолоджувальної води й у зв'язку з цим використовувати таку витрату як управляючу змінну не має сенсу. Тому у подальшому вона не розглядається.

У інших випадках в якості управляючої змінної використовується витрата початкового розчину. Однак застосування такої змінної для управління режимом роботи ВУ є недоцільним, а іноді й просто неможливим, так як зміна витрати початкового розчину являється збуренням для попередньої технологічної стадії й може привести до розузгодження навантажень послідовно працюючого обладнання.

Отже, в якості управляючих змінних ВУ слід використовувати сигнали регуляторів, які керують витратами нагрівальної пари та паровідборів (значення таких сигналів можуть бути легко перелічені у значення відповідних витрат).

Незважаючи на різнобарвність запропонованих критеріїв управління, відомих математичних моделей та управляючих змінних, не вирішеними залишаються наступні питання :

- чи існує можливість реалізувати оптимальне керування ВУ за любым із названих вище критеріїв незалежно від технологічної схеми установки;
- які математичні моделі слід використовувати задля розрахунку тих або інших критеріїв керування;

- як наявність або відсутність тих чи інших управляючих змінних вплине на можливість використання тих або інших критеріїв керування.

Розглянемо детально ці питання.

3.2. Керування за заданою кінцевою концентрацією розчину

Якщо для певного статичного режиму роботи ВУ кінцева концентрація b_K упареного розчину задана, це означає, що фактично задана продуктивність ВУ за випареною водою, це впливає з матеріального балансу по абсолютно сухим речовинам,

$$W_0 = \frac{b_K - b_0}{b_K} S_0,$$

(3.5)

де S_0, b_0 – відповідно витрата та концентрація розчину, що подається на упарювання.

Для установок без паровідбору як управляючу змінну фактично можна використовувати тільки витрату нагрівальної пари. Така задача може бути виконана кількома методами.

Спрощений метод ґрунтується на припущенні (справедливому з достатньою точністю для багатьох випадків), що 1 кг нагрівальної пари утворює 1 кг вторинної пари, тобто

$$D_i = W_i,$$

(3.6)

де D_i, W_i – витрати відповідно нагрівальної і вторинної пари i -го корпусу ВУ, кг/с.

У найпростішому випадку за умови однакових конструкцій випарних апаратів можна припустити, що $W_1 = W_2 = \dots = W_i = \dots = W_n$ (n – номер останнього за ходом пари ВА), й тоді

$$D_0 = W_0 / n.$$

(3.7)

За застосуванням такого методу найбільша похибка спостерігається для останнього ВА, оскільки в цьому апараті ефект самовипарювання найвищий, одночасно теплові витрати в навколишнє середовище найменші, а це не враховує розрахунок.

Загальновживаним методом визначення D_0 виступає метод, суть якого полягає у спільному розв'язанні систем рівнянь теплового та матеріального балансів відносно витрат нагрівальної та вторинної пари по корпусах.

За наявності паровідбору з ВУ слід розглянути два випадки.

Перший випадок має місце, коли всі паровідбори фіксовані, тобто їх витрати визначаються технологічними потребами інших ділянок виробництва та змінюються залежно від змін на цих ділянках. У такому випадку задача управління ВУ, як і раніше, зводиться до розрахунку потрібної витрати нагрівальної пари D_0 , яку можна провести методами, наведеними вище.

Другий випадок - паровідбори можуть мати довільне значення з урахуванням екстремального характеру залежності продуктивності W_0 ВУ від витрат пари у відбір, тобто їх витрати разом з витратою нагрівальної пари мають розглядатися як змінні, які оптимізуються. Оптимальні значення таких витрат мають розраховуватися за математичною моделлю процесу з використанням процедури оптимального пошуку. При цьому доцільно витрати D_0 нагрівальної пари підтримувати на мінімально потрібному рівні, а це покращить економічні показники ВУ.

3.3. Керування за критерієм продуктивності за випареною водою

Коли перед ВУ ставиться задача забезпечення максимальної продуктивності установки незалежно від значень всіх інших економічних показників (якість готового продукту, питомі енерго- та трудовитрати та ін.) або за їх обмежень, при відсутності або фіксованості паровідборів задача управління має досить простий вид:

$$\begin{aligned} D_B &= D_B^{\max}; \\ \mu_0 &= \mu_0^{\max} \end{aligned}, \quad (3.8)$$

де $D_B^{\max}$ – максимально доцільна витрата охолоджувальної води на вузол конденсації вторинної пари, кг/с.

Для схем ВУ з паровідбором задача керування установкою дещо ускладнюється, оскільки з'являються додаткові можливості за рахунок оптимального вибору значень паровідборів. У такому випадку задачу керування також можна представити як задачу нелінійного програмування

$$\begin{aligned} W_0 &\rightarrow \max; \\ \mu_i^{\min} &\leq \mu_i \leq \mu_i^{\max} \end{aligned}. \quad (3.9)$$

Подібна задача може бути розв'язана за допомогою моделі, яка наведена у розділі 3. Як і в попередньому випадку слід звернути увагу на доцільність підтримання мінімально можливого D_0 для покращення економічних показників роботи ВУ. У разі відомих обмежень на такі показники вони мають враховуватись при формулюванні задачі (3.9).

3.4. Керування за критерієм питомої собівартості процесу випарювання

За синтезу системи управління ВУ має сенс розглядати тільки змінну складову (3.2) цього критерію, а не власне сам критерій (3.1).

В умовах відсутності паровідбору з ВУ або його фіксованості, якщо немає ніяких обмежень на концентрацію кінцевого продукту, задача управління

установкою формулюється наступним чином:

$$\begin{aligned} C &\rightarrow \min \\ \mu_i^{\min} &\leq \mu_i \leq \mu_i^{\max} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Зазвичай при випарюванні будь-яких розчинів існують вимоги до концентрації кінцевого продукту. А це означає, що продуктивність W_0 ВУ за випареною водою повинна мати певне значення згідно рівнянню (3.5). У

випадку, що розглядається, тобто при умові відсутності паровідборів або їх фіксованості задача мінімізації питомої собівартості процесу фактично трансформується в задачу забезпечення заданої продуктивності W_0 ВУ, яка розглядалася вище. Це обумовлюється тим, що не можна за рахунок однієї управляючої дії μ_0 розв'язати дві задачі – забезпечити мінімальне C і задане W_0 . А це означає, що для даного типу ВУ з урахуванням обмежень на концентрацію упареного продукту задача мінімізації собівартості процесу випарювання не може бути розв'язана.

Для схем ВУ з паровідбором за відсутності обмежень на концентрацію упареного продукту задача управління практично повторює вираз (3.10), але він має бути доповнений додатковими обмеженнями $\mu_i^{\min} \leq \mu_i \leq \mu_i^{\max}$, а також у разі необхідності обмежень на економічні показники процесу.

За необхідності забезпечення заданого значення концентрації b_K упареного продукту задача управління матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} C &\rightarrow \min \\ \mu_i^{\min} &\leq \mu_i \leq \mu_i^{\max}, \\ W_0 &= W_0^{\text{sad}}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

де W_0^{sad} – задане значення продуктивності ВУ, що обчислюється за формулою (3.5). Для розв'язання такої задачі слід скористатися моделлю, яка згадувалась вище.

3.5. Узагальнений алгоритм керування

З результатів проведеного вище аналізу випливає, що як самостійні критерії при організації оптимального управління статичними режимами роботи ВУ доцільно застосовувати наступні: продуктивність за випареною водою, концентрацію упареного розчину та і змінну складову питомої собівартості процесу випарювання. Вибір того або іншого критерію керування має здійснюватись, виходячи не скільки з техніко-економічних вимог виробництва, а й з урахуванням технологічної схеми установки, вона

повинна надавати можливість технічної реалізації розрахованого оптимального технологічного режиму.

3.5.1 Базові положення алгоритму

Незалежно від обраного критерію оптимальності у загальному виді задача оптимального управління статичним режимом роботи ВУ може бути записана:

$$\begin{aligned} X &\rightarrow \text{extr}; \\ \mu_i^{\min} &\leq \mu_i \leq \mu_i^{\max} \end{aligned} \quad (3.12)$$

де X - обраний критерій оптимальності.

Характерною особливістю ВУ як об'єкта керування виступає його нестационарність. Вона пов'язана з процесом накипоутворення, що має місце на теплообмінних поверхнях випарних апаратів. Процес накипоутворення доцільно оцінювати за значеннями комплексних показників $k_i F_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ (n – номер останнього ВА). Для цього слугує спеціальна модель, застосовуючи яку в алгоритмі керування ВУ, можна “відслідковувати” зміну стану теплообмінних поверхонь ВА шляхом введення у модель статичного режиму роботи ВУ значень $k_i F_i$, які відповідають поточному стану теплообмінних поверхонь. Згідно досвіду експлуатації ВУ, найбільші зміни комплексних показників $k_i F_i$ відбуваються у тому ВА, де найвищий температурний режим та/або найвища концентрація розчину, який упарюється.

Важливим елементом будь-якого алгоритму управління виступає доцільна періодичність розв'язку задачі управління. Очевидно, що потреба розв'язку цієї задачі виникає тоді, коли вхідні змінні ВУ зазнали суттєвих змін. Технологічними вхідними змінними вважають: витрату S_0 , температуру t_0 та концентрацію b_0 розчину, яка подається на випарювання; температуру T_g нагрівальної пари; температуру t_v охолоджувальної води на вузол конденсації. Для установок з паровідбором

у тих випадках, коли витрати E_i ($i = 1, 2, \dots, n$) вторинної пари у відбір (i – номер ВА, після якого пара відбирається) регламентуються потребами технологічних ділянок виробництва, з якими пов'язана ВУ, то до вхідних треба також віднести значення E_i . Окрім того, для урахування процесу накопчування до вхідних слід віднести також і значення комплексних показників $k_m F_m$ у тому m -му ВА, де вони зазнають найбільших змін у процесі експлуатації (якщо зміни $k_i F_i$ у всіх ВА приблизно однакові, то всі $k_i F_i$ слід включати до вхідних змінних).

Тобто, на момент часу τ практична необхідність у пошуку нового оптимального режиму виникає лише у такому випадку, коли є суттєві зміни у перелічених вище вхідних змінних. Така умова може бути записана:

$$\begin{cases} |S_0^\tau - S_0^{\tau-1}| > \Delta S_0; \\ |t_0^\tau - t_0^{\tau-1}| > \Delta t_0; \\ |b_0^\tau - b_0^{\tau-1}| > \Delta b_0; \\ |T_\Gamma^\tau - T_\Gamma^{\tau-1}| > \Delta T_\Gamma; \\ |t_B^\tau - t_B^{\tau-1}| > \Delta t_B; \\ |k_m F_m^\tau - k_m F_m^{\tau-1}| > \Delta kF, \end{cases}$$

(3.13)

де літерою Δ позначені чисельні значення, що прийняті за суттєві для відповідних вхідних змінних, а τ і $\tau-1$ означають даний та попередній моменти часу розв'язку задачі управління.

Стає очевидним, що вирішальну роль щодо періодичності розв'язку задачі управління відіграє вибір величин ΔS_0 , Δt_0 , ..., ΔkF . Зазвичай числові значення таких величин обирають з досвіду експлуатації ВУ. Проте такі рекомендації не є конкретними, а це може привести до зниження ефективності алгоритму управління, що пропонується. Більш доцільним виявляється вибір числових значень величин, які розглядаються, такими, які приводять до зміни числового значення

критерію керування X , але не перевищують інформативну точність ΔX математичної моделі при використанні в алгоритмі управління.

Розв'язок задачі (3.13) передбачає застосування пошукових методів оптимізації. Тривалість пошуку оптимуму при цьому багато в чому залежить від критерію зупинки пошуку. Існують два підходи.

Перший полягає у тому, що, маючи на увазі цілеспрямованість пошуку, або те, що пошук направлений на знаходження таких значень управляючих змінних μ_i ($i = 0, 1, \dots, m$), при яких критерій X досягає свого екстремального значення, в якості критерію зупинки пошуку можна прийняти умову

$$|\mu_i^j - \mu_i^{j-1}| \leq \Delta \mu_i, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (3.14)$$

де j - номер ітерації пошуку.

Величина $\Delta \mu_i$ може бути обрана з урахуванням, як приклад, метрологічної точності відповідних вимірювальних каналів. Однак слід зазначити, що розрахований технологічний режим можливо не співпадає з “ідеальним” оптимумом, але ми маємо з цим “миритися”, тому що технічні можливості, які наявні у нашому розпорядженні, не дозволяють реалізувати “ідеал”.

Згідно іншого підходу критерієм зупинки пошуку може бути наступна нерівність

$$|X^j - X^{j-1}| \leq \Delta X, \quad (3.15)$$

де ΔX або задається, виходячи з техніко-економічних міркувань, або, як приклад, дорівнює інформативній точності моделі ВУ. У такому випадку, як і у попередньому, можливо, розрахований оптимум знову ж таки відрізняється від “ідеального”, але продовжувати пошук стає недоцільним у зв'язку з обмеженими метрологічними можливостями та точністю математичної моделі, яку при цьому використовують.

3.5.2. Алгоритм керування

Структурна схема алгоритму керування статичними режимами роботи ВУ наведена на рис.3.1.

Блок 1 здійснює формування масиву початкових даних, які необхідні для розрахунків за алгоритмом. До таких даних належать змінні: витрата S_0 , температура t_0 та концентрація b_0 упарюваного розчину; температура T_g та витрата D_0 нагрівальної пари; витрати E_i ($i=1,2,\dots,m$) паровідборів; температури T_i ($i=1,2,\dots,n$) по корпусам установки, які необхідні для розрахунку блоком 2 поточних значень $k_i F_i$ ($i=1,2,\dots,n$), які характеризують стан теплообмінних поверхонь випарних апаратів.

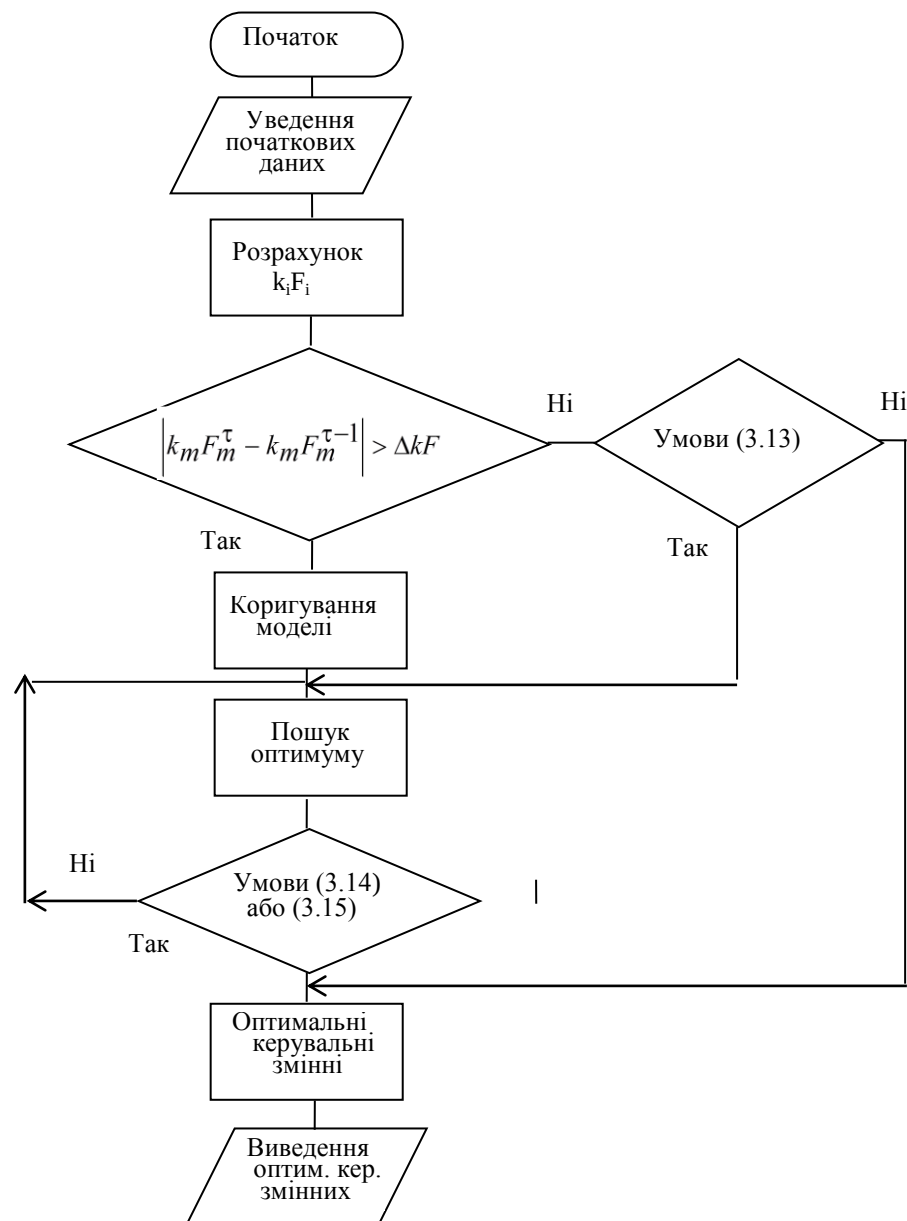




Рис.3.1 Алгоритм керування статичними режимами роботи ВУ

Блок 3 визначає, яких суттєвих змін зазнав стан теплообмінних поверхонь ВА, аналізує для цього виконання останньої нерівності з системи (3.13) або перевіряє аналогічні нерівності за всіма $k_i F_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). У випадку зміни стану поверхонь (блок 3 – „Так”), блок 4 здійснює коригування математичної моделі ВУ, яка полягає у заміні „старих” значень $k_i F_i$ на „нові”, розраховані блоком 2.

Якщо ж стан теплообмінних поверхонь не змінився (блок 3 – “Ні”), то надалі блок 5 перевіряє виконання всіх нерівностей (3.13) (за винятком останньої, яка була перевірена раніше). Невиконання жодної з нерівностей свідчить про те, що розраховувати новий оптимальний технологічний режим немає потреби, після чого здійснюється перехід до блоку 8, де зберігаються числові значення управляючих змінних, які були визначені як оптимальні на момент розрахунків, що передував даному таї блоком 9 виводяться такі числові дані як результат роботи алгоритму. На цьому робота алгоритму закінчується.

У разі виконання хоча б однієї з нерівностей (3.13) (блок 5 – “Так”), блок 6 виконує розв’язок задачі керування (3.12) на основі математичної моделі ВУ, використовуючи при цьому один з методів нелінійного програмування, який реалізується блоком 8.

Пошук оптимуму закінчується при виконанні умов зупинки (3.14) або (3.15), що аналізуються блоком 7. Після цього у блоці 8 формуються нові оптимальні значення управляючих змінних, які й виводяться блоком 9 як результат роботи алгоритму.

3.6. Алгоритм проектування систем керування випарними установками

Основним показником економічної ефективності системи керування (СК) випарними установками являється річний економічний ефект від її впровадження, він являє собою сумарну економію у розрахунковому році всіх виробничих ресурсів. Показник річного економічного ефекту використовується задля оцінки доцільності розробки кожної конкретної СК, вибору найбільш ефективного варіанту системи, оцінки економічної ефективності науково-дослідницьких робіт по створенню СК та оцінки ефективності науково-дослідницької діяльності підприємств – розробників систем.

Джерела економічної ефективності, характер та ступінь впливу СК на техніко-економічні показники виробництва залежать від функціональних, програмних й технічних рішень, а також від особливостей самої ВУ. Зазвичай основну частку економічного ефекту від впровадження СК отримують завдяки покращенню функціонування ВУ в результаті застосування системи оптимізації його режимів роботи.

Річний економічний ефект від застосування системи управління визначається за формулою

$$EF = P - E_H K_C,$$

де P - річна економія (річний приріст прибутку) від функціонування СК;

K_C - одноразові витрати, пов'язані із створенням та впровадженням СК;

E_H - середньогалузевий нормативний коефіцієнт економічної ефективності капіталовкладень, який зазвичай дорівнює 0,15.

Тобто, при розрахунку річного економічного ефекту слід визначити річну економію, яку отримаємо за рахунок впровадження системи, і капіталовкладення, що необхідні для її створення.

Розрахунковий коефіцієнт економічної ефективності характеризує величину річної економії:

$$E_P = P/K_C . \quad (3.16)$$

Створення системи управління вважається економічно доцільним заходом, якщо розрахунковий коефіцієнт ефективності виявиться не менш нормативного для даної галузі коефіцієнта $E_{но}$:

$$E_P \geq E_{но} \quad (3.17)$$

Розглянута методика визначення економічної доцільності розробки СК носить досить загальний характер й не враховує впливу метрологічних похибок вимірювальних каналів й каналів керування СК на її економічну ефективність, що часто приводить до завищення значення очікуваного економічного ефекту від впровадження системи управління і, в кінці кінців, інколи до помилкового висновку щодо доцільності розробки СК.

Ясно, що чим вище точність математичної моделі та технічних засобів вимірювання та управління, тим з більшою точністю визначається та реалізується оптимальний технологічний режим роботи ВУ, тим в більшій мірі розрахункова річна економія P від впровадження СК відповідає реальній.

Мірою точності математичної моделі ВУ з урахуванням метрологічних похибок каналів вимірювання та управління може служити інформативна точність моделі ТОК.

Якщо виявляється, що покращення ΔX показника якості функціонування ВУ, що обумовлює річну економію P , яку планується отримати у результаті використання системи управління, значно перевищує інформативну точність математичної моделі, яку використовують у даній системі:

$$\Delta X \gg \Delta X_M , \quad (3.18)$$

то створювати систему управління для розглядаємого ВУ має сенс.

Зрозуміло, що при цьому слід прагнути до підвищення інформативної точності математичної моделі, що використовується в СК, це може бути досягнуто зменшенням метрологічних похибок каналів вимірювання та керування за рахунок використання технічних засобів більш високого класу точності. Однак це приводить до підвищення вартості комплексу технічних засобів (КТЗ) системи управління, а отже підвищує капіталовкладення, що потрібні для створення СК, а це в свою чергу, знижує економічний ефект від впровадження системи.

Отже, метрологічні похибки каналів вимірювання та управління мають вплив як на річну економію P , а це є, у свою чергу, однією зі змінних складових річного економічного ефекту, так й на іншу його змінну складову – капіталовкладення K_C . Причому зменшення метрологічних похибок шляхом

обирання відповідних технічних засобів системи управління, з одного боку, збільшує річну економію, тобто, підвищує економічний ефект від її впровадження, а, з іншого боку, приводить до підвищення капіталовкладень на створення СК, а це, в свою чергу, зменшує величину річного економічного ефекту.

Таким чином, при проектуванні систем управління ВУ виникає оптимальна задача: необхідність створити СК ВУ, характеристики точності якої (мається на увазі характеристики КТЗ та вибраної математичної моделі) й відповідні капіталовкладення забезпечують отримання максимального економічного ефекту від впровадження СК.

Критерієм оптимальності при розв'язку такої задачі може служити коефіцієнт економічної ефективності, його необхідно максимізувати.

У розрахунках E_P з метою підвищення чутливості критерію оптимальності доцільно враховувати капіталовкладення не в повному обсязі K_C , а лише їх частину – вартість комплексу технічних засобів K , мають на увазі, що інші складові K_C , є сталими. Сформульовану задачу необхідно розв'язувати на етапі проектування системи управління ВУ.

Структурна схема алгоритму проектування системи управління ВУ наведена на рис.3.2.

Блок 1 здійснює введення початкових даних, до них належать: закони розподілу вхідних змінних ВУ та характеристики цих законів; характеристики всіх технічних засобів, які використовуються у кожному із розглянутих варіантів КТЗ СК, а також їх вартості, нормативний коефіцієнт економічної ефективності $E_{но}$ для даної галузі промисловості; кількість годин роботи ВУ протягом року.

Блок 2 – блок присвоєння $j=0$ (j - номер ітерації при пошуку найкращого варіанту КТЗ) та $E_p^{opt} = 0$ (E_p^{opt} - оптимальне значення коефіцієнта економічної ефективності).

Блок 3 виконує вибір з банка варіантів КТЗ (блок 4) чергового варіанту КТЗ з метою подальшого його дослідження.

Блок 5 розраховує вартість обраного варіанту КТЗ.

У блоці 6 поточній змінній i присвоюється числове значення нуль (i - номер ітерації при пошуку найкращої математичної моделі ВУ).

Блок 7 здійснює вибір з банка моделей ВУ (блок 8) чергової математичної моделі, після цього в блоці 9 на основі початкових даних про закони розподілу вхідних змінних ВУ та характеристики таких законів розраховується економія ΔX_E^{ij} , вона може бути досягнута у результаті впровадження даної системи управління, що використовує розглянуту математичну модель.

У блоці 10 обчислюється інформативна точність розглянутої математичної моделі ВУ ΔX_M^{ij} .

Блок 11 порівнює кількісну оцінку інформативної точності моделі ВУ з розрахунковою економією, що отримуємо на основі використання такої моделі. Якщо нерівність (3.18) виконується (блок 11 - “Так”), то здійснюється перехід до блоку 20, де розраховується річна економія від впровадження СК згідно формули

$$P^{ij} = \Delta X^{ij} \tau,$$

де P^{ij} - річна економія від впровадження системи керування при використанні j - го варіанту КТЗ та i -ої математичної моделі ВУ;

ΔX^{ij} - економія від впровадження СК у розрахунку на годину роботи ВУ;

τ - кількість годин роботи ВУ за рік.

Далі у блоці 21 обчислюється розрахункове значення коефіцієнту економічної ефективності $E_p^{ij} = P^{ij} / K_j$, де K_j - вартість j -го варіанту КТЗ.

Блок 22 аналізує, чи виявляється розглянутий ij - й варіант СК краще за раніше досліджувані ($E_p^{ij} > E_p^{opt}$). У разі, якщо це так (блок 22 - “Так”), то розраховане значення коефіцієнту економічної ефективності блоком 23 сприймається за оптимальне на даному етапі пошуку. При цьому запам’ятовується i -й номер відповідної моделі ВУ і та j - й номер варіанту КТЗ, після цього здійснюється перехід до блоку 12. Перехід до блоку 12 здійснюється й після виконання операцій, передбачених блоком 22, якщо нерівність $E_p^{ij} > E_p^{opt}$ не виконується (блок 22 - “Ні”), а також після блока 11 тоді, коли не виконується нерівність (3.18) (блок 11 - “Ні”), перевірка виконання якого здійснюється цим блоком.

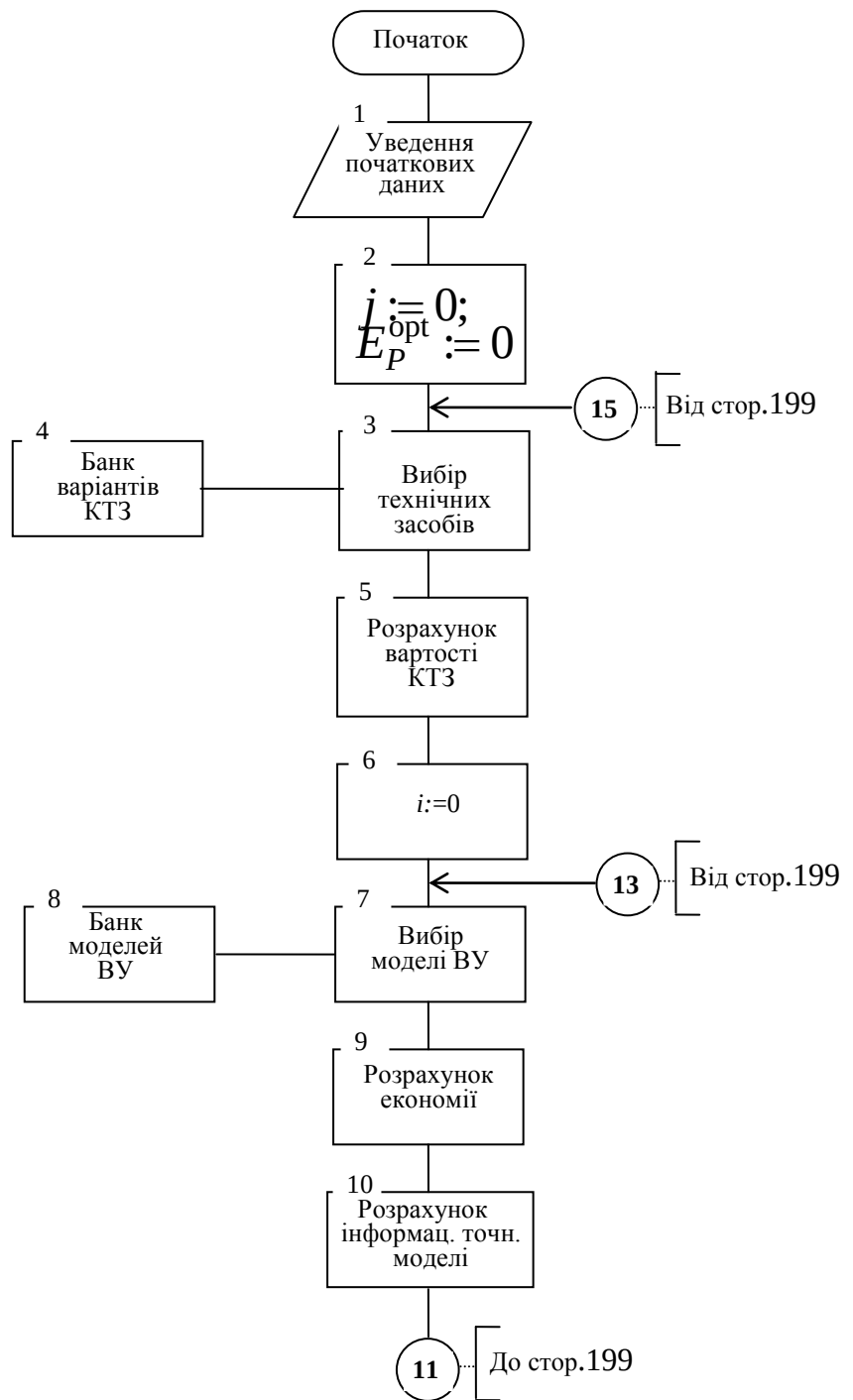


Рис.3.2 Схема алгоритму проектування системи керування ВУ

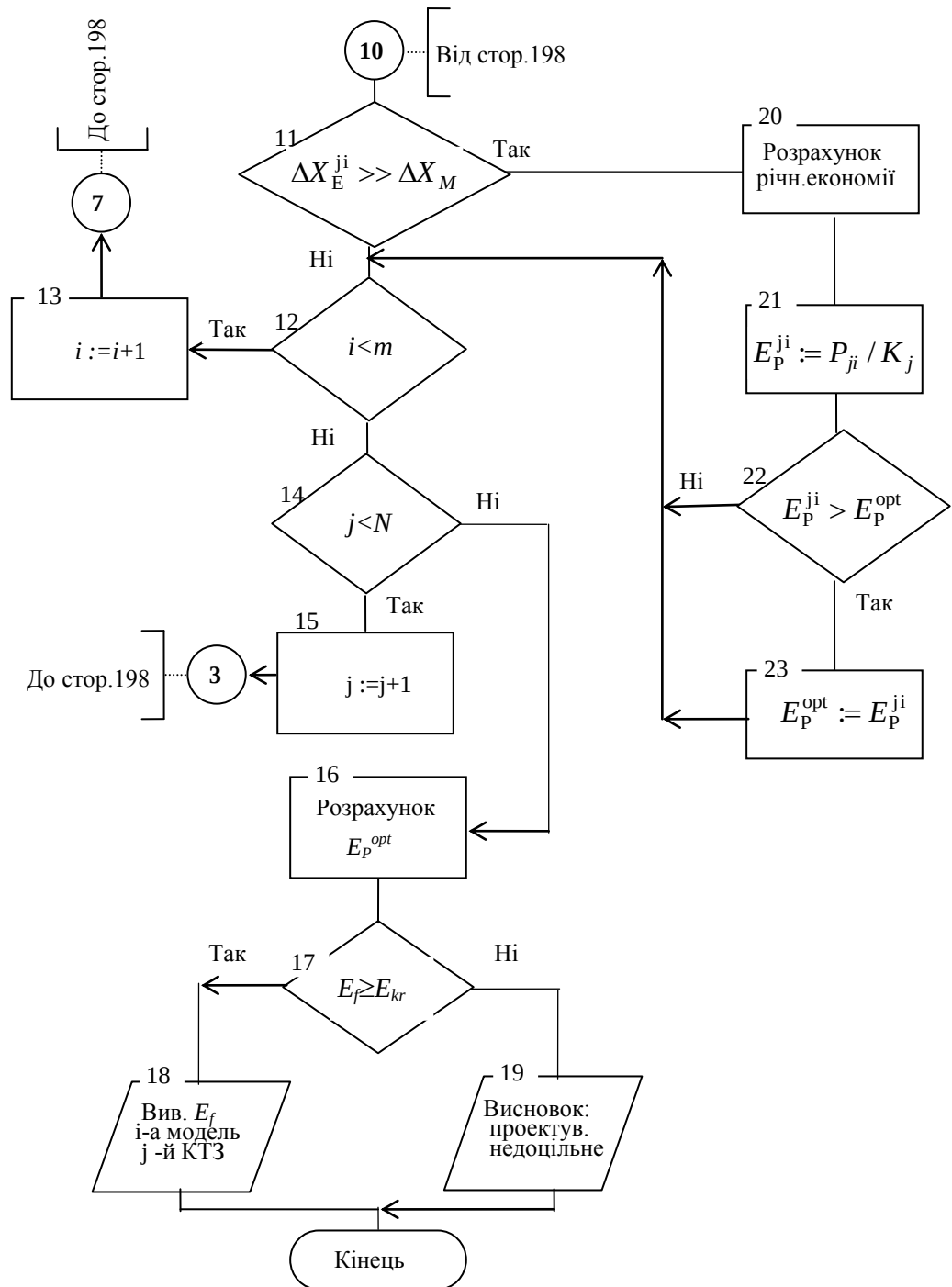


Рис.3.2 (Продовження)

Блок 12 перевіряє, чи всі розглядаємі математичні моделі ВУ (m -кількість розглядуваних моделей) досліджені при даному j - му варіанті КТЗ. Якщо не всі (блок 12 - “Так”), то здійснюється перехід до наступної ітерації (до блоку 7), для цього у блоці 13 змінюється номер ітерації ($i=i+1$). Якщо ж

при j - му варіанті КТЗ досліджені всі моделі ВУ, які є у наявності (блок 12 – “Ні”), то далі блоком 14 аналізується, чи всі варіанти КТЗ розглянуті (N - кількість розглядуваних варіантів КТЗ). Якщо розглянуті не всі N варіантів (блок 14 - “Так”), то у блоці 15 змінюється номер ітерації ($j = j+1$) й здійснюється перехід до блоку 3.

Якщо всі можливі варіанти КТЗ розглянуті (блок 14 - “Ні”), тобто знайдений найкращий варіант СК ВУ, який саме проектується, то в блоці 16 визначається фактичне значення розрахункового коефіцієнта економічної ефективності, відповідне знайденому E_p^{opt} , з урахуванням постійної частини капіталовкладень:

$$E_f^{opt} = P^{opt} / (K_j^{opt} + F),$$

де E_f^{opt} - фактичне оптимальне значення коефіцієнту економічної ефективності;

P^{opt} - величина річної економії, відповідна E_p^{opt} ;

K_j^{opt} - вартість оптимального варіанту КТЗ;

F - постійна частина капіталовкладень на створення СК у вартісному виразі.

Далі блок 17 перевіряє, чи більше фактичне значення коефіцієнта економічної ефективності відповідного нормативного коефіцієнта. Якщо нерівність виконується (блок 17 - “Так”), то розробка та впровадження системи управління ТОК економічно доцільно, тому блоком 18 здійснюється вивід оптимального значення коефіцієнта економічної ефективності E_p^{opt} та відповідних йому математичної моделі ВУ й варіанту КТЗ системи управління. Інакше (блок 17 - “Ні”) за допомогою блоку 19 виводиться “Проектування недоцільне”. На цьому робота алгоритму закінчується.

Отже, застосування такого алгоритму дозволяє не тільки визначити економічну доцільність розробки системи управління випарної установки на етапі її проектування, але й обрати такий її варіант, при якому забезпечується найбільша економічна ефективність від її впровадження.

РОЗДІЛ 4

СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ВИПАРНИМИ УСТАНОВКАМИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1. Система автоматичного контролю стану теплообмінних поверхонь випарних апаратів

У процесі експлуатації ВУ стан теплообмінних поверхонь ВА здебільшого визначається процесом накипоутворення. Такий процес невинно погіршує теплопередавальну спроможність поверхонь теплообміну між теплоносієм (нагрівальною або вторинною парою попереднього корпусу) та упарюваним розчином. Це приводить до зміни теплового режиму ВА навіть при сталості решти вхідних змінних.

Такі обставини обумовлюють потребу урахування поточних змін стану теплообмінних поверхонь ВА при побудові системи управління ВУ.

Як наведено в розділі 3 кількісною оцінкою стану теплообмінних поверхонь ВА слугують комплексні показники $k_i F_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$; n - кількість ВА у складі ВУ). Це означає, що для ефективного функціонування системи управління слід розробити систему автоматичного контролю таких показників. Схема такої системи для одного ВА наведена на рис. 4.1.

Для розрахунку $k_i F_i$ i -го ВА на об'єкті управління встановлені датчики температур розчину на вході t_{i-1} та виході t_i ВА, температур нагрівальної T_{i-1} і вторинної T_i пари, витрат упарюваного розчину S_{i-1} , нагрівальної пари W_{i-1} та екстрапари E_{i-1} .

За вимірними значеннями температур у блоці 1 обчислюються коефіцієнти випаровування

$$\alpha_i = \frac{f + gT_{i-1}}{f + f_1 T_i - c_B t_i},$$

та самовипаровування

$$\beta_i = \frac{t_{i-1} - t_{i-1}}{f + f_1 T_i - c_B t_i},$$

де f_1, f_1, g - сталі коефіцієнти;

c_B - питома теплоємність води.

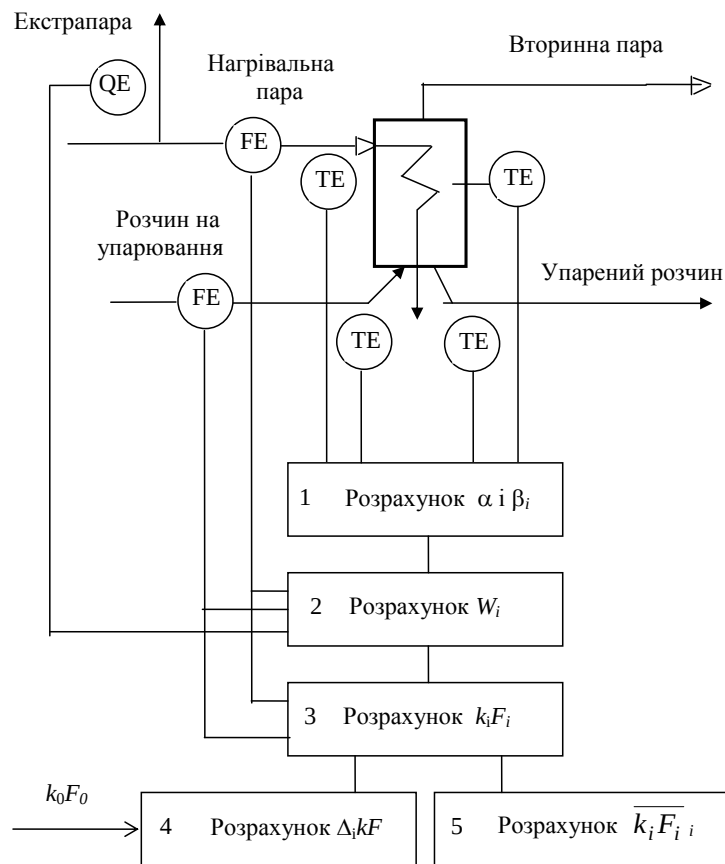


Рис. 4.1. Схема системи автоматичного контролю стану теплообмінних поверхонь ВА

Далі у блоці 2 розраховується кількість води W_i , що випарюється в i -му ВА:

$$W_i = \frac{S_{i-1}\beta_i + E_{i-1}\alpha_i}{1 - \alpha_i}.$$

Після цього блоком 3 визначають поточні значення комплексного показника:

$$k_i F_i = (W_i - S_{i-1} c_{i-1} \beta_i) \frac{f + f_1 T_{i-1} - c_B t_i}{T_{i-1} - T_i},$$

значення якого і являються характеристикою поточного стану теплообмінних поверхонь.

Далі розраховані дані можуть бути використані, як приклад, для обчислення величини зменшення $\Delta_i kF$ комплексного показника $k_i F_i$ по відношенню до його значення $k_0 F_0$ на початку циклу роботи ВУ (блок 4):

$$\Delta_i kF = k_0 F_0 - k_i F_i.$$

На підставі обчисленого $\Delta_i kF$ можна прийняти рішення про зміну теплового режиму ВА, про його зупинку для промивання та чищення і т.д.

В іншому випадку, знаючи $k_i F_i$, можна розрахувати середнє $\overline{kF}$ (блок 5):

$$\overline{kF} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} k_i F_i(\tau) d\tau,$$

яке можливо використати, як приклад, для зупинки ВА для промивання та чищення, коли виконується нерівність

$$k_i F_i < \overline{kF}.$$

У разі, коли треба контролювати стан теплообмінних поверхонь не одного апарату, а ВУ в цілому, кількість вимірювальної апаратури у розрахунку

на один ВА може бути зменшена, а змінні, які не вимірюються, можна розрахувати, використовуючи математичну модель, розглянуту у розділі 2.

На рис. 4.2. наведена схема системи автоматичного контролю стану теплообмінних поверхонь випарної установки СВО-4 за випарюванням води на АЕС.

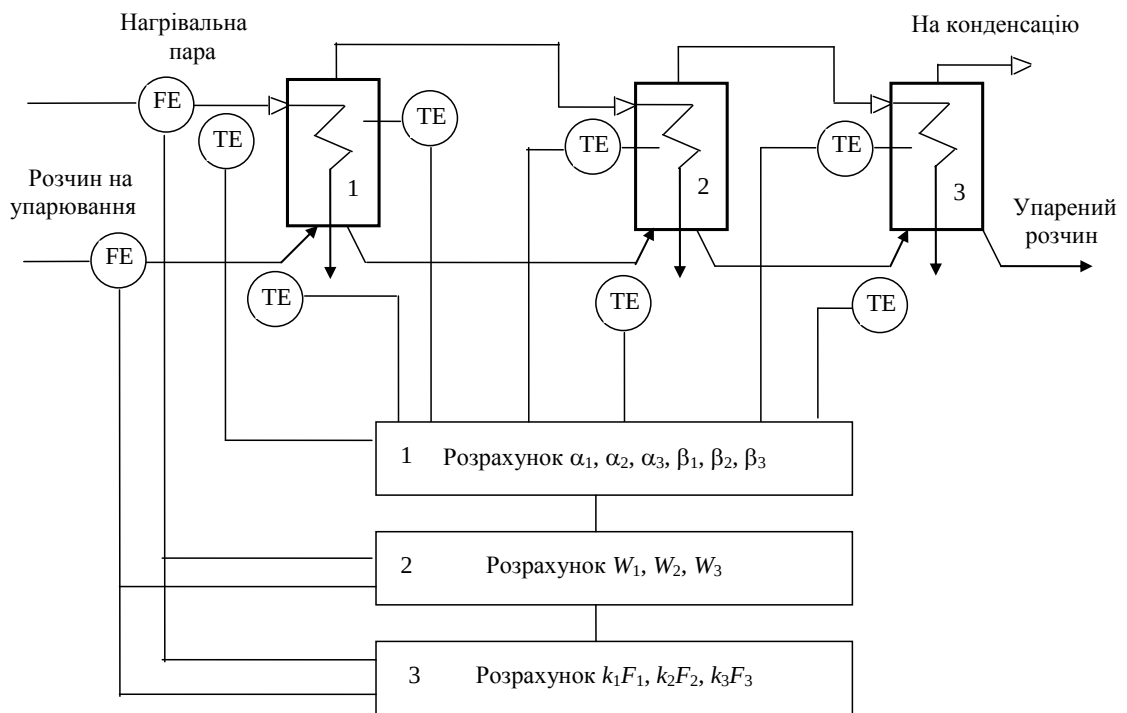


Рис. 4.2. Схема системи автоматичного контролю за станом теплообмінних поверхонь ВУ

Для забезпечення роботи системи використовуються датчики наступних технологічних параметрів: температур нагрівальної T_0 та вторинної T_1, T_2, T_3 пари по корпусам ВУ; температур t_1, t_2, t_3 розчину на виході з кожного ВА; витрати нагрівальної пари D_0 та розчину S_0 , яка подається на упарювання, а також температури t_0 розчину на вході до ВУ.

Інформація про виміряні технологічні параметри надходить у блок 1, де розраховують коефіцієнти випаровування $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ та самовипаровування $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ за формулами

$$\alpha_1 = \frac{f + gT_0}{f + f_1T_1 - c_Bt_1}; \quad \beta_1 = \frac{t_0 - t_1}{f + f_1T_1 - c_Bt_1};$$

$$\alpha_2 = \frac{f + gT_1}{f + f_1T_2 - c_Bt_2}; \quad \beta_2 = \frac{t_1 - t_2}{f + f_1T_2 - c_Bt_2};$$

$$\alpha_3 = \frac{f + gT_2}{f + f_1T_3 - c_Bt_3}; \quad \beta_3 = \frac{t_2 - t_3}{f + f_1T_3 - c_Bt_3}.$$

Знайдені коефіцієнти, а також значення вимірних D_0 та S_0 використовуються у блоці 2 задля обчислення витрати випареної води по корпусам ВУ:

$$W_1 = D_0\alpha_1 + S_0c_0\beta_1;$$

$$W_2 = W_1\alpha_2 + (S_0c_0 - c_BW_1)\beta_2;$$

$$W_3 = W_2\alpha_3 + [S_0c_0 - c_B(W_1 + W_2)]\beta_3$$

де c_0 - питома теплоємність упарюваного розчину.

Значення комплексних показників k_1F_1, k_2F_2, k_3F_3 розраховують у блоці 3 за формулами:

$$k_1F_1 = (W_1 - S_0c_0\beta_1) \frac{f + f_1T_0 - c_Bt_1}{T_0 - T_1};$$

$$k_2F_2 = [W_2 - (S_0c_0 - c_BW_1)\beta_2] \frac{f + f_1T_1 - c_Bt_2}{T_1 - T_2};$$

$$k_3F_3 = \{W_3 - [S_0c_0 - c_B(W_1 + W_2)]\beta_3\} \frac{f + f_1T_2 - c_Bt_3}{T_2 - T_3}.$$

Як й раніше для окремого ВА, на підставі розрахованих значень комплексних показників приймається рішення відносно режимів подальшої експлуатації ВУ.

Розглянута ВУ – прямотечійна. У разі протитечійної ВУ, або установки мішаної течії для визначення комплексних показників k_iF_i ($i = 1, 2, \dots, m$) необхідно використовувати відповідні формули.

4.2. Системи оптимального управління статичними режимами роботи випарних установок

Як наведено у розділі 3, при побудові системи оптимального управління статичними режимами роботи ВУ як самостійні критерії оптимальності слід використовувати такі технологічні показники, як кінцева концентрація b_K упареного розчину та продуктивність W_0 ВУ за випареною водою, а також економічний показник C – змінну складову питомої собівартості процесу випарювання, що розраховується за формулою

$$C = \frac{a_1 D_0}{W_0} \quad (4.1)$$

де a_1 - вартість одиниці витрати нагрівальної пари;

D_0 - витрата нагрівальної пари.

Як викладено вище, вимога стабілізації на заданому рівні кінцевої концентрації b_K упареного розчину для кожного статичного режиму (а це означає, при відомих витраті S_0 та концентрації b_0 розчину, що подається на упарювання) зводиться до задачі стабілізації на заданому рівні продуктивності W_0 за випареною водою, оскільки

$$W_0 = \left(1 - \frac{b_0}{b_K}\right) S_0. \quad (4.2)$$

Тобто, у подальшому розглянемо три системи управління статичними режимами ВУ:

- систему стабілізації заданої продуктивності за випареною водою;
- систему управління, яка забезпечує максимальну продуктивність ВУ за випареною водою;
- систему управління, яка забезпечує мінімальну собівартість процесу випарювання.

4.2.1. Система стабілізації заданої продуктивності за випареною водою

Для ВУ без паровідборів або з фіксованими паровідборами задача стабілізації заданої продуктивності установки за випареною водою фактично зводиться до задачі визначення потрібної витрати D_0 нагрівальної пари. Приблизно таку витрату можна розрахувати так:

$$D_0 = \frac{W_0}{n},$$

де n - кількість корпусів ВУ.

Цією формулою можна скористатись для установок, у яких не утворюється накип на теплообмінних поверхнях ВА. Але таких ВУ зараз практично не існує.

У процесі експлуатації ВУ в умовах накипоутворення задля забезпечення необхідної продуктивності установки слід поступово збільшувати витрату D_0 нагрівальної пари навіть за умови незмінності вхідних технологічних змінних.

Задля більш точного розрахунку D_0 пропонується ввести поправочний коефіцієнт γ , або

$$D_0 = \frac{W_0}{n} \gamma.$$

Величина такого коефіцієнту має коригуватись у залежності від стану теплообмінних поверхонь у тому ВА, в якому процес накипоутворення найбільш інтенсивний.

Схема системи автоматичної стабілізації заданої продуктивності ВУ за випареною водою для установок без паровідбору (або з фіксованими їх значеннями) приведена на рис. 4.3. На ньому представлена схема, яка відповідає ситуації, коли найбільш інтенсивний процес накипоутворення протікає у першому ВА. Якщо це не так, то відповідні датчики температур й вхідних витрат повинні бути встановлені на тому ВА, де інтенсивність накипоутворення найвища.

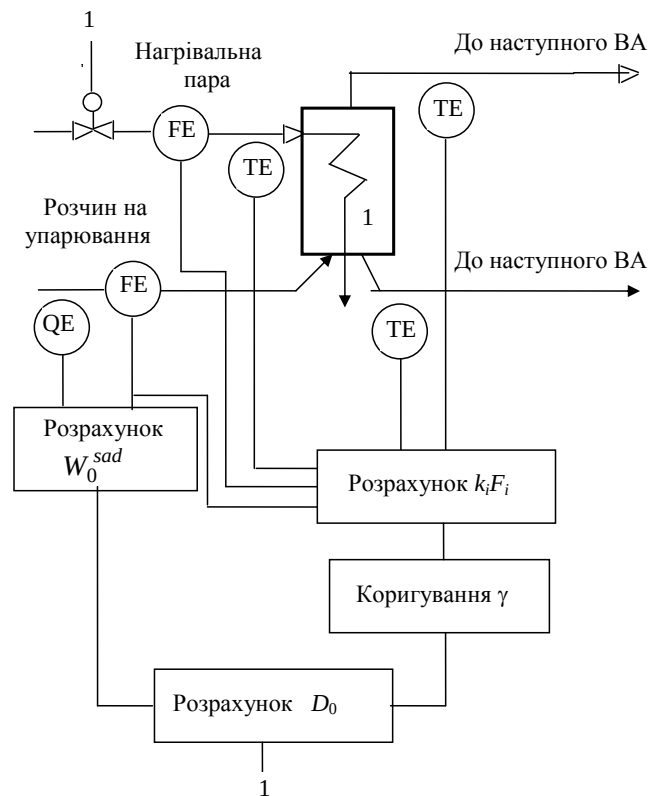


Рис. 4.3. Схема системи стабілізації продуктивності ВУ без паровідборів

Якщо є потреба враховувати стан теплообмінних поверхонь усіх ВА установки, то усі випарні апарати мають бути обладнані відповідними датчиками для розрахунку $k_i F_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), а коефіцієнт γ має бути скоригований у залежності від значень усіх таких показників. Коригувальний сигнал у цьому випадку може бути пропорційним, як приклад, середньому арифметичному значень усіх $k_i F_i$, або зваженому середньому, де найбільша вага буде належати комплексному показнику того ВА, де процес накипоутворення найбільш інтенсивний.

Слід зазначити, що запропонована система стабілізації, схема якої наведена на рис. 4.3, є в певному розумінні системою із додатнім зворотним зв'язком. Тут мова йде про те, що коригуючи коефіцієнт γ і

збільшуючи при цьому витрату D_0 нагрівальної пари, ми ще в більшій мірі інтенсифікуємо процес накипоутворення, а це, у свою чергу, викликає потребу подальшого коригування γ і т.д.

Для ВУ з нефіксованим паровідбором задана стабілізація продуктивності установки за випареною водою - це задача нелінійного програмування.

Схема подібної системи для прямотечійної 3-корпусної ВУ з двома паровідборами наведена на рис. 4.4.

Робота системи починається з визначення за формулою (4.2) потрібної продуктивності W_0^{sad} за інформацією від датчиків концентрації та витрати розчину, який подається на упарювання.

Одночасно за інформацією з датчиків температур пари по корпусам ВУ та розчину на виході з них, а також витрат нагрівальної пари D_0 і упарюваного розчину S_0 , розраховуються поточні значення комплексних показників $k_i F_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$).

Вони використовуються задля коригування математичної моделі статичних режимів ВУ.

Далі здійснюється пошук оптимальних значень витрат нагрівальної пари D_0 та паровідборів E_i ($i = 1, 2, \dots, m$), які й реалізуються як уставки відповідних регуляторів.

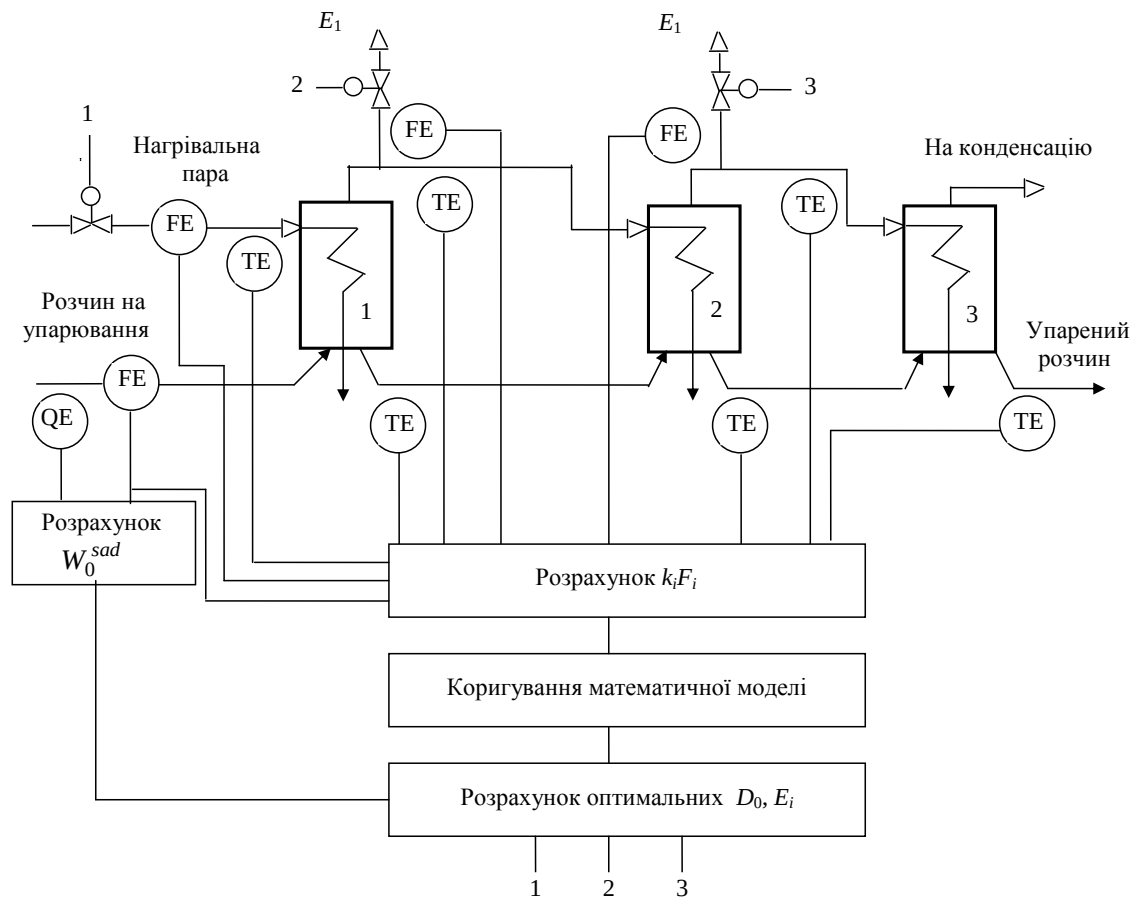


Рис. 4.4. Схема системи стабілізації продуктивності ВУ при наявності паровідборів

4.2.2. Система управління з максимальною продуктивністю ВУ за випареною водою

Для ВУ як з паровідборами, так й без них, максимальна продуктивність за випареною водою досягається за умови забезпечення максимально можливої витрати нагріваної пари.

У ВУ з паровідборами на відміну від установок без паровідбору (або з фіксованими паровідборами) може бути збільшена продуктивність за рахунок вибору оптимальних величин витрат вторинної пари у відбір. В зв'язку з цим після встановлення максимального значення D_0 система управління повинна, використовуючи математичну модель статичних

режимів ВУ, знайти оптимальні значення E_i ($i = 1, 2, \dots, m$; m - кількість паровідборів), що забезпечують максимальне W_0 .

Якщо установка обладнана одним паровідбором, то пошук оптимального значення паровідбору виконується екстремальним регулятором за умови роботи систем стабілізації рівнів по апаратах ВУ.

При цьому пошук продуктивності ВУ за випареною водою розраховується як різниця між витратами вхідного S_0 та вихідного S_K розчину.

Схема такої системи наведена на рис. 4.5.

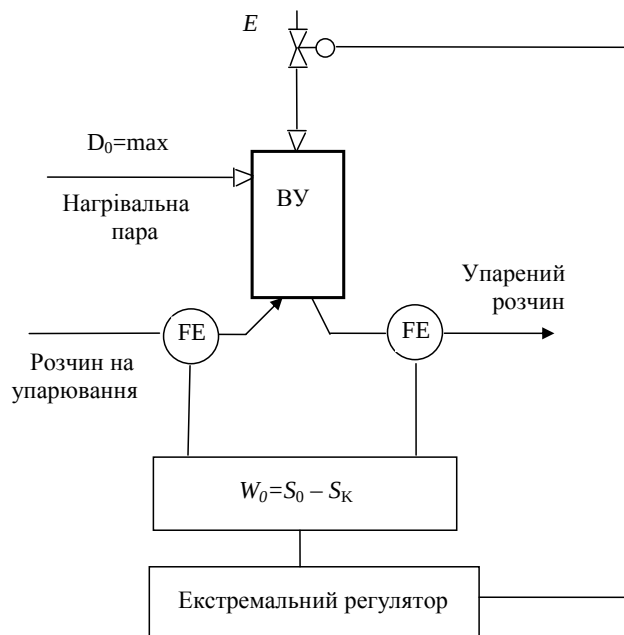


Рис. 4.5. Схема системи управління, яка забезпечує максимальну продуктивність ВУ з одним паровідбором

Принципово кількість паровідборів може бути й більшою і тоді слід використовувати багатоканальний екстремальний регулятор. Але, враховуючи інерційність ВУ, це не доцільно внаслідок можливості виникнення коливальних режимів з великою амплітудою.

Необхідно підкреслити, що організація управління ВУ за умови забезпечення максимальної продуктивності, фактично може бути доцільною тільки як виняток, у випадку вимог технологічної ситуації на

виробництві. Це пояснюється тим, що при такому керуванні тепловий режим установки найбільш “жорсткий”, що, у свою чергу означає, що процес накипоутворення у ВА проходить найбільш інтенсивно. Експлуатація ВУ у такому режимі постійно призводить до скорочення робочого циклу й до більш частих зупинок ВУ на промивання та чищення, а це, в решті решт, приводить до зменшення середньоциклової продуктивності установки.

4.2.3. Система управління, яка забезпечує мінімальну собівартість процесу випарювання

Враховуючи, що ВУ, зазвичай, являються проміжною стадією у загальному виробництві, а також те, що ВУ відносять до енергоємних об’єктів, організація управління, яка забезпечує мінімізацію собівартості ведення процесу випарювання виявляється найбільш доцільною.

Реалізація подібного управління можлива тільки для установок, що мають паровідбори, з урахуванням обмежень на кінцеву концентрацію упареного розчину.

Схема подібної системи фактично повторює схему системи стабілізації продуктивності ВУ, наведену на рис. 4.4. На відміну від системи стабілізації, система оптимального управління за критерієм собівартості процесу випарювання за пошуком оптимальних значень витрат нагрівальної пари та паровідборів слід користуватись критерієм (4.1).

Необхідно зазначити, що, як й у попередній системі управління, яку розглядали у п.4.2.2., мінімізація поточної собівартості процесу випарювання в загальному випадку не гарантує мінімального середньоциклового значення такого показника.

4.3. Системи оптимального управління циклічністю роботи випарних установок

Системи оптимального управління циклічністю роботи ВУ умовно поділяємо на: призначені для визначення оптимальної тривалості циклу роботи установки, і такі, що керують технологічними змінними, що використовуються у системі як управляючі змінні, задля забезпечення екстремального значення інтегрального техніко-економічного показника, обраного за критерій управління циклічністю роботи ВУ.

4.3.1. Система оптимізації тривалості циклу роботи випарних установок

Задача визначення оптимальної тривалості циклу роботи ВУ виникає тоді, коли технологічні (управляючі) змінні установки задіяні задля вирішення задач управління статичними режимами. В залежності від технологічної схеми установки подібними задачами виступають стабілізація продуктивності ВУ на заданому рівні, ведення процесу випарювання з мінімальною його собівартостю та ін.

Але система оптимізації циклічності роботи ВУ має включати в себе систему оптимізації статичного режиму саме за тим критерієм, який використовується задля розв'язку задачі оптимальної циклічності. Структурна схема такої системи наведена на рис. 4.6.

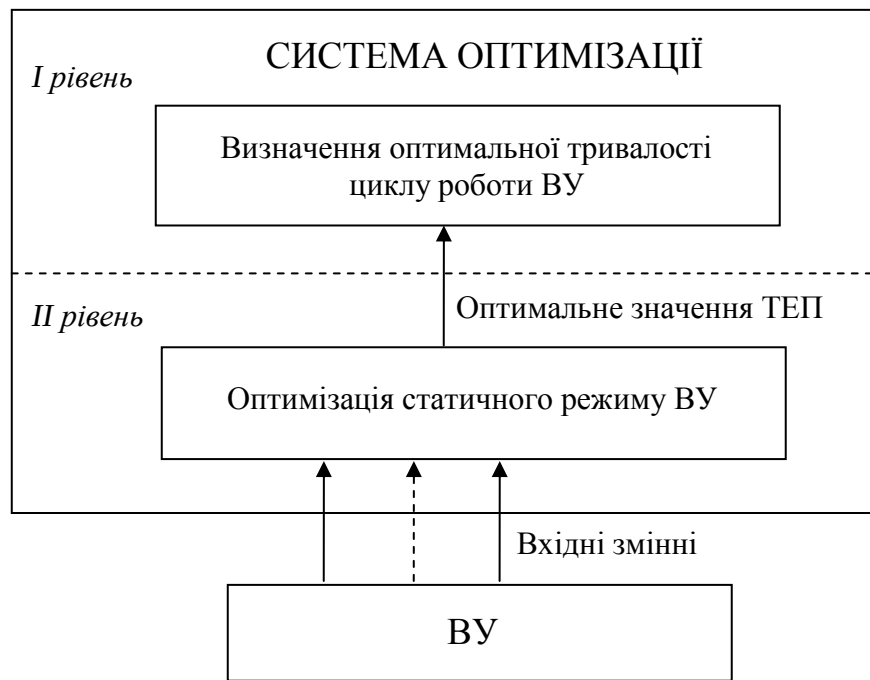


Рис. 4.6. Структурна схема системи оптимізації тривалості циклу роботи ВУ

На основі інформації про значення технологічних змінних ВУ на другому рівні системи обчислюється поточне значення техніко-економічного показника, що обраний за критерій оптимальності циклічності роботи установки. У загальному випадку такий показник може не співпадати з критерієм оптимізації статичного режиму роботи ВУ.

На першому рівні системи визначається значення оптимальної тривалості робочого періоду за циклом. При цьому задля завчасного попередження обслуговуючого персоналу про зупинку ВУ та задля проведення профілактичних робіт може бути використане прогнозування критерію управління.

4.3.2. Система оптимального управління циклічністю роботи випарних установок за інтегральними техніко-економічними показниками

Коли технологічні змінні ВУ, що використовуються як управляючі (витрати нагрівальної пари і паровідборів) не задіяні для реалізації потрібного статичного

режиму роботи установки, тоді можна здійснити управління ВУ за інтегральними техніко-економічними показниками, які розглянуті вище. Результатом розв'язку оптимальної задачі тоді будуть не тільки оптимальна тривалість робочого періоду у циклі роботи ВУ, а й оптимальні значення управляючих змінних.

Структурна схема системи оптимального управління циклічністю роботи ВУ наведена на рис. 4.7.

За інформацією про вхідні змінні розраховуються значення комплексних показників $k_i F_i$ ($i=1,2,...,n$), що кількісно визначають процес накипоутворення. Далі за відомою методикою [6], здійснюється прогнозування таких показників. Використовуючи прогнозовані значення $k_i F_i(\tau)$ задля кожного кроку розрахунку визначають оптимальні значення управляючих змінних $D_0(\tau)$ і E_i ($i = 1, 2, ..., m$), що забезпечують екстремальне значення техніко-економічного показника, обраного за критерій управління. Паралельно як одна із змінних, яка підлягає оптимізації, також визначається оптимальна тривалість T_p робочого періоду у циклі роботи ВУ.

Розраховані управляючі змінні являються уставками відповідних регуляторів витрат нагрівальної пари та паровідборів. Такі уставки можна реалізувати на ВУ вручну, або, після розрахунків на їх підставі відповідні технологічні змінні, оптимальним чином перейти з режиму на режим, використовуючи методи динамічної оптимізації.

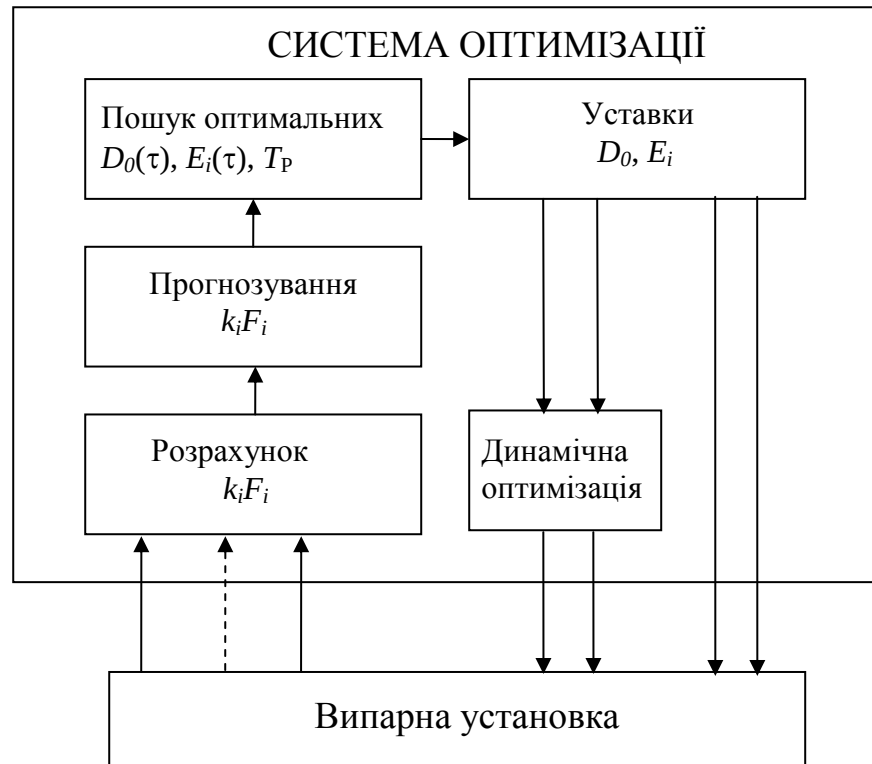


Рис. 4.7 Структурна схема системи оптимального управління циклічністю роботи ВУ

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз сучасного стану питань математичного моделювання та оптимального управління випарних установок. Він показав:

а) одним з визначальних чинників, які впливають на роботу випарних установок, являється процес накопчування, він зумовлює нестационарні властивості ВУ як об'єкту управління;

б) існуючі зараз математичні моделі випарних установок призначені для проектних й перевірочних розрахунків, аналізу статичних й динамічних характеристик випарних апаратів та установок, визначення оптимальних статичних режимів роботи ВУ, але не враховують нестационарні властивості самого процесу випарювання;

в) існуючі системи управління випарними установками призначені для стабілізації певного статичного режиму роботи ВУ задля підтримання обраного техніко-економічного показника на оптимальному рівні й, також не враховують нестационарні властивості процесу випарювання;

г) задача оптимізації циклічності роботи випарних установок у відомих системах управління зводиться до визначення оптимальної тривалості робочого періоду у циклі роботи установки, не враховуючи оптимальних значень технологічних змінних, реалізація яких могла б забезпечити найкращі середньоциклові показники роботи ВУ;

д) впровадження у виробництво сучасних комп'ютерних технологій висуває нову проблему – створення новітнього математичного й алгоритмічного забезпечення комп'ютерних систем оптимального управління випарними установками задля вирішення наступних головних завдань:

- ефективного урахування процесу накопчування, який відбувається при випарюванні розчинів у випарних установках та зумовлює нестационарні властивості останніх як об'єктів управління;

- розв'язання всіх задач оптимального управління випарними установками у їх взаємозв'язку.

2. Розроблено узагальнений алгоритм оптимального управління статичними режимами роботи ВУ, він враховує нестационарності процесу випарювання, передбачає адаптацію математичної моделі, відповідно якої здійснюється пошук оптимального технологічного режиму.

3. Розроблений алгоритм оптимального проектування систем управління ВУ з урахуванням метрологічних похибок вимірювальних каналів. Використання такого алгоритму дозволяє не тільки визначити економічну доцільність розробки системи управління випарної установки на етапі її проектування, але й обрати такий її варіант, при якому можлива найбільша економічна ефективність від її впровадження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Таубман Е.И. Выпаривание. – М.: Химия, 1982. – 328 с.
2. Белик В.Г., Федоткин И.М. Моделирование и оптимизация выпарных установок с пароотбором. – К.: Техніка, 1974. – 132 с.
3. Либерман И.Г. Автоматизация и оптимизация вакуум-выпарных устано-вок.– М.: Машиностроение, 1972. – 229 с.
4. Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии. – Л.: Химия, 1977. – 591 с.
5. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1974. – 288 с.
6. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
7. Таубман Е. И. Расчет и моделирование выпарных установок. – М.: Химия, 1970. – 215 с.
8. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1972. – 493 с.
9. Фрэнкс Р. Математическое моделирование в химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 272 с.
10. Кафаров В.В. Основы массоотдачи. – М.: Высшая школа, 1972. – 494 с.
11. Чермак И., Петерка В., Заворка И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии. – М.: Мир, 1972. – 623 с.

ОХОРОНА ПРАЦІ

Законодавчі та нормативні акти з питань охорони праці в Україні

Сучасний розвиток науки та техніки привносить принципові нововведення у всі сфери матеріального виробництва, суттєво змінюючи технологічні процеси й використовувані матеріали, предмети та знаряддя праці. В свою чергу, зміни технології та устаткування призводять до трансформації умов праці та трудового процесу в цілому. Охорона життя та здоров'я громадян у процесі їх трудової діяльності, створення безпечних і нешкідливих умов праці є важливим пріоритетом у промислово розвинених країнах (зокрема, європейських). Оскільки Україна прагне стати членом Європейського Союзу (ЄС), одним із найважливіших державних завдань є адаптація нашого трудового законодавства і найрізноманітніших технічних вимог, регламентів, алгоритмів і стандартів до усталених у ЄС норм і правил. Великого значення при цьому набувають заходи з охорони праці (ОП).

ОП – це система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці [3, 4].

Правовою основою законодавства щодо ОП в нашій державі є: Конституція України, Закони України: «Про охорону праці», «Основи законодавства України про охорону здоров'я», «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування», а також Кодекс цивільного захисту України (КЦЗ) і Кодекс законів про працю України (КЗпП) [2].

Спеціальними юридичними актами в галузі ОП є: Нормативно-правові акти з охорони праці (НПАОП), Міждержавні стандарти Системи стандартів безпеки праці (ГОСТ ССБТ), Державні стандарти України (ДСТУ), Санітарні правила і норми (СанПіН), Державні будівельні норми (ДБН), Правила

технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС), Правила улаштування електроустановок (ПУЕ), норми технічного проектування та інші нормативні акти, виходячи із сфери їх дії [2, 3,4].

У статті 43 Конституції України записано: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає», «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом» [3, 9].

У статті 45 Конституції України записано: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає, або на яку вільно погоджується», «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом», «Використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється» [9].

Стаття 46 Конституції України гарантує громадянам право на соціальний захист [9].

Основоположним законодавчим документом в галузі ОП є Закон України «Про охорону праці» [14], дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах. У ньому закріплені основні принципи державної політики в сфері ОП:

- пріоритет життя і здоров'я працівників по відношенню до результатів виробничої діяльності підприємства;
- повна відповідальність роботодавця за створення безпечних і нешкідливих умов праці;
- повне відшкодування шкоди особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань;
- здійснення навчання населення, професійної підготовки, підвищення кваліфікації працівників з охорони праці та ін.

Особливістю Закону України «Про охорону праці» є високий рівень прав та гарантій робітникам. Вперше в історії держави робітникам було

надано право відмовлення від роботи у випадку існування на виробництві загрози для їхнього здоров'я та життя. Розширено права робітників у соціальних гарантіях відшкодування збитків у випадку пошкодження їх здоров'я на виробництві. Передбачається нова система фінансування ОП, формування системи страхування від нещасних випадків та профзахворювань, посилюється централізація планування. За державою закріплено функції нагляду та управління ОП [3, 14].

В системі законодавства щодо охорони здоров'я та гігієни праці ключове місце займають закони України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» і «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» [3, 2]. Вони передбачають розробку та здійснення адміністрацією підприємств санітарних та протиепідемічних заходів; здійснення в необхідних випадках лабораторного контролю за дотриманням вимог санітарних норм стосовно рівнів шкідливих факторів виробничого середовища; формування органів та установ державної санепідемслужби при надзвичайній події та ситуації, що становлять небезпеку для здоров'я населення; відшкодування в установленому порядку працівникам громадянам збитків, яких завдано їх здоров'ю в результаті порушення санітарного законодавства.

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» є основоположним у ядерному законодавстві України. Він встановлює пріоритет безпеки людини та навколишнього природного середовища, права і обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з використанням ядерних установок та джерел іонізуючого випромінювання, встановлює також правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії [3, 2].

Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування», відповідно до Конституції України, визначає правову основу, економічний механізм та організаційну структуру загальнообов'язкового державного соціального страхування громадян від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які призвели до втрати

працевдатності або загибелі застрахованих на виробництві [3, 2].

КЦЗ України (від 02.10.2012 р.) регулює відносини, пов'язані із захистом населення, територій, навколишнього середовища та майна від надзвичайних ситуацій, реагуванням на них, функціонуванням єдиної державної системи цивільного захисту, та визначає повноваження органів державної влади, органів місцевого самоврядування, права та обов'язки громадян України, іноземців та осіб без громадянства, підприємств, установ і організацій, незалежно від форми власності [7].

КЗпП України [8] регулює трудові відносини між працівниками та роботодавцями, сприяючи зростанню продуктивності праці, поліпшення якості роботи, підвищенню ефективності суспільного виробництва і піднесенню на цій основі матеріального і культурного рівня життя трудящих, зміцненню трудової дисципліни і поступовому перетворенні праці на благо суспільства. Законодавство про працю встановлює високий рівень умов праці й всемірну охорону трудових прав працівників (стаття 1 КЗпП) [8]. Крім того, у КЗпП зазначені наступні положення: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років (стаття 176), а також осіб молодших 18 років (стаття 192); забороняється застосовувати праці жінок на важких роботах і роботах із шкідливими або небезпечними умовами праці, а також на підземних роботах (стаття 174) [3, 2, 8].

НПАОП, які до початку 2003 року носили назву Державні нормативні акти про охорону праці (ДНАОП), – це правила, норми, положення, стандарти, інструкції та інші документи, обов'язкові до виконання [3, 2]. Законодавством передбачено, що залежно від сфери дії НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими і вносяться до Державного Реєстру. Реєстр ДНАОП, що діють на території України, виданий Держнаглядом охорони праці у 1997 році. З 2003 року ведеться реєстр НПАОП, який постійно поповнюється [3, 2].

ГОСТ ССБТ колишнього СРСР застосовуються на території України, як Міждержавні стандарти, до їх заміни іншими нормативними документами,

якщо вони не суперечать чинному законодавству України [3, 2]. Поступово їм на заміну вводяться національні державні стандарти – ДСТУ. ДСТУ почали розроблятися з 1992 року.

СанПіН – обов’язкові для виконання нормативні документи, що визначають критерії безпеки та (або) нешкідливості для людини факторів довкілля і вимоги щодо забезпечення оптимальних чи допустимих умов життєдіяльності людини [2]. Вони відносяться до норм, які затверджуються Міністерством охорони здоров’я України.

ДБН – нормативний акт технічного характеру, що встановлює обов’язкові вимоги до нормування у будівництві (планування та забудова території, об’єкт будівництва, містобудування та архітектури і його складові частини, склад і зміст документації об’єктів будівництва, містобудування та архітектури) [3, 23].

ПТЕЕС встановлюють основні організаційні й технічні вимоги до експлуатації електроустановок та електрообладнання напругою до 150 кВ включно [2].

ПУЕ визначають будову, принципи улаштування, особливі вимоги до окремих систем, їх елементів, вузлів і комунікацій електроустановок. ПУЕ встановлюють вимоги до електроустановок загального призначення змінного струму напругою до 750 кВ та постійного струму напругою до 1,5 кВ [13].

Виходячи із специфіки і особливих умов на своїх підприємствах, власники підприємств, установ, організацій або уповноважені ними органи розробляють, на основі НПАОП, і затверджують власні нормативні акти з ОП, що діють в межах підприємства. Такі нормативні акти можуть відхилятися від НПАОП лише у бік покращення умов для працюючого [3].

Серед типових нормативних актів підприємства з ОП можна виділити:

- положення про систему управління ОП на підприємстві;
- положення про службу ОП на підприємстві;
- положення про комісію з питань ОП підприємства;
- положення про роботу уповноважених трудового колективу з питань ОП;

- положення про навчання, інструктаж, і перевірку знань працівників з питань ОП;
- положення про організацію і проведення первинного та повторного інструктажів, а також пожежно-технічного мінімуму;
- наказ про порядок атестації робочих місць щодо їх відповідності до нормативних актів про ОП;
- положення про санітарію лабораторій підприємства;
- інструкції про порядок зварювання і проведення інших вогневих робіт на підприємстві;
- загальнооб'єктові та цехові інструкції про заходи пожежної безпеки;
- перелік робіт з підвищеною небезпекою;
- перелік посадових осіб підприємства, зобов'язаних проходити попередню і періодичну перевірки знань з ОП;
- наказ про організацію безкоштовної видачі працівникам певної категорії лікувально-профілактичного харчування;
- наказ про організацію безкоштовної видачі молока або інших рівноцінних харчових продуктів працівникам підприємства, що працюють у шкідливих умовах;
- наказ про порядок забезпечення працівників підприємства спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

Відповідно до статті 49 Закону України «Про охорону праці», за порушення законодавчих та інших нормативних актів про ОП, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за ОП і представників трудових колективів й профспілок, винні притягаються до дисциплінарної, адміністративної та кримінальної відповідальності, згідно із законодавством [14].

**Шкідливі та небезпечні фактори виробництва при експлуатації
випарних установок та систем керування ними**

На будь-якому підприємстві існує та чи інша категорія небезпеки трудових процесів, а також поняття шкідливих та небезпечних факторів виробництва.

Небезпека – це наслідок такої дії певних факторів на людину, яка, при їх невідповідності фізіологічним характеристикам людини, зумовлює феномен самої небезпеки [3].

Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор (чинник), вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження працездатності працівника [3, 4].

Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор (чинник), дія якого, за певних умов, може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника [3, 4].

До визначаючих ознак небезпечних і шкідливих факторів відносяться: можливість безпосередньої негативної дії на організм людини; ускладнення нормального функціонування органів людини; можливість порушення нормального стану елементів виробничого процесу, в результаті якого можуть виникнути аварії, вибухи, пожежі, травми.

Конкретні умови діяльності істотно впливають на психічні та життєво важливі функції людини. Якщо вплив факторів (з врахуванням їх взаємодії) в конкретних умовах діяльності такий, при якому забезпечується нормальне здійснення психічних та життєво важливих функцій організму, не виникає високого напруження компенсаторних систем організму і вдало виконується задана трудова діяльність, то такі умови можуть бути визначені як сприятливі, або комфортні, а в найкращих умовах – як оптимальні. Коли, в силу дії факторів, виникає високе напруження компенсаторних систем організму, то такі умови визначаються як несприятливі, або дискомфортні, а при вираженому несприятливому ефекті – як екстремальні [2, 3, 4].

За характером та природною впливу всі небезпечні та шкідливі фактори виробництва поділяються на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

При експлуатації випарних установок виділяються шкідливі речовини

(різні сполуки газів). Шкідливими вважаються речовини, що при контакті з організмом людини, за умов порушення вимог безпеки, можуть призвести до виробничої травми, професійного захворювання або розладів у стані здоров'я, що визначаються сучасними методами як у процесі праці, так і у віддалені строки життя теперішнього і наступних поколінь (ГОСТ 12.1.007-76). Шкідливі речовини можуть проникати в організм людини через органи дихання, органи травлення, а також шкіру та слизові оболонки. Через дихальні шляхи потрапляють пари, газо- та пилоподібні речовини, через шкіру переважно рідкі речовини. Через шлунково-кишкові шляхи потрапляють речовини під час ковтання, або при внесенні їх в рот забрудненими руками.

Основним шляхом надходження промислових шкідливих речовин до організму людини є дихальні шляхи. Завдяки величезній (понад 90 м²) всмоктувальній поверхні легенів утворюються сприятливі умови для потрапляння шкідливих речовин у кров.

Шкідливі речовини, що потрапили в організм? можуть викликати отруєння (гострі чи хронічні). Ступінь отруєння залежить від токсичності речовини, її кількості, часу дії, шляхів проникнення, метеорологічних умов, індивідуальних особливостей організму. Гострі отруєння виникають в результаті одноразової дії великих доз шкідливих речовин (чадний газ, метан, сірководень). Хронічні отруєння розвиваються внаслідок тривалої дії на людину невеликих концентрацій шкідливих речовин (свинець, ртуть, марганець). Шкідливі речовини, потрапивши до організму, розподіляються в ньому нерівномірно. Найбільша кількість, наприклад, свинцю накопичується в кістках, фтору – в зубах, марганцю – в печінці. Такі речовини мають властивість утворювати в організмі так зване «депо» і затримуватись в ньому на тривалий період часу.

При хронічному отруєнні шкідливі речовини можуть не лише накопичуватись в організмі (матеріальна акумуляція), але й викликати «накопичення» функціональних ефектів (функціональна кумуляція).

В санітарно-гігієнічній практиці прийнято поділяти шкідливі речовини на хімічні речовини та промисловий пил [3, 4].

Хімічні речовини (шкідливі та небезпечні), відповідно до

ГОСТ 12.0.003-74, за характером впливу на організм людини поділяються на:

- загальнотоксичні, що викликають отруєння всього організму (ртуть, оксид вуглецю, толуол, анілін);
- подразнюючі, що викликають подразнення дихальних шляхів та слизових оболонок (хлор, аміак, сірководень, озон);
- сенсibiliзуючі, що діють як алергени (альдегіди, розчинники та лаки на основі нітросполук);
- канцерогенні, що викликають ракові захворювання (ароматичні вуглеводні, аміносполуки, азбест);
- мутагенні, що викликають зміни спадкової інформації (свинець, радіоактивні речовини, формальдегід);
- що впливають на репродуктивну (відтворення потомства) функцію (бензол, свинець, марганець, нікотин).

Серед фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів слід виділити:

- рухомі машини, механізми, пересувні частини виробничого устаткування, що можуть завдати фізичних ушкоджень;
- підвищена температура та вологість повітря робочої зони;
- вібрації від засобів механізації, електрифікованих машин та механізми, які використовуються на різних технологічних ланках, а також бути вентиляторних агрегатів систем вентиляції;
- підвищений рівень шуму, інфразвукових коливань, ультразвуку, іонізуючих та електромагнітних випромінювань, статичної електрики, ультрафіолетової чи інфрачервоної радіації;
- небезпечне значення напруги в електричному колі;
- відсутність чи нестача природного світла.

Суттєво небезпечним фактором виробництва є можливість виникнення пожежі, оскільки виробництво протікає з використанням великої температури.

Пожежа – це неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, що розповсюджується в часі і просторі та створює загрозу життю і здоров'ю людей, навколишньому середовищу, призводить до матеріальних збитків.

Пожежна небезпека – можливість виникнення та (або) розповсюдження пожежі в будь-якій речовині, процесі, стані. Слід зазначити, що пожеж безпечних не буває. Якщо вони і не створюють прямої загрози життю та здоров'ю людини (наприклад, лісові пожежі), то завдають збитків довкіллю призводять до значних матеріальних втрат. Коли людина перебуває в зоні впливу пожежі, то вона може потрапити під дію наступних небезпечних та шкідливих факторів: токсичні продукти згорання; підвищена температура середовища; вогонь; дим; недостатність кисню; руйнування будівельних конструкцій; вибухи, витікання небезпечних речовин, що відбуваються внаслідок пожежі; паніка.

Небезпека підвищеної температури середовища полягає в тому, що вдихання розігрітого повітря разом із продуктами згорання може призвести до ураження органів дихання та смерті. В умовах пожежі підвищення температури середовища до 60 °C вже є життєво-небезпечною для людини .

Біологічно небезпечні й шкідливі виробничі фактори включають біологічні об'єкти: патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, гриби, найпростіші організми), комахи і тварини, а також продукти їх життєдіяльності [3, 4].

Психофізіологічні небезпечні і шкідливі фактори по характеру дії підрозділяються на фізичні перевантаження (статичні і динамічні) і нервово-психологічні (розумова перенапруга, монотонність праці, емоційні перевантаження) [2, 3].

Необхідно враховувати, що у виробничих умовах працівники, як правило, зазнають одночасного впливу кількох шкідливих чи небезпечних виробничих факторів.

Заходи з повного усунення або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів виробництва при експлуатації випарних установок та систем керування ними

Для зменшення забруднення шкідливими речовинами повітряного

середовища та захисту працюючих, пропонуються загальні заходи та засоби попередження при експлуатації випарних установок та систем керування ними. Зокрема, вилучення шкідливих речовин з технологічних процесів і заміна їх менш шкідливими. Наприклад, свинцеві білила можуть бути замінені на цинкові, метиловий спирт – іншими спиртами, органічні розчинники для знежирювання – миючими розчинами на основі води. Автоматизація і дистанційне керування технологічними процесами та обладнанням можуть взагалі виключити безпосередній контакт працюючих із шкідливими речовинами. Контроль за вмістом шкідливих речовин в повітрі робочої зони, використання засобів індивідуального захисту, герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування під розрідженням та локалізація шкідливих виділень, за рахунок місцевої вентиляції теж дають суттєві результати щодо ОП працюючих.

Для запобігання травматизму від рухомих машин, механізмів, пересувних частин виробничого устаткування, можуть бути застосовані захисні загородження, кожухи, екрани та попереджувальні знаки.

Все виробниче обладнання має відповідати загальним вимогам, визначеним ГОСТ 12.2.00-91. Відповідно до цього нормативного документа безпечність виробничого устаткування забезпечується правильним вибором принципів дії, конструктивних схем, елементів конструкції; використанням засобів механізації, автоматизації та дистанційного керування; застосуванням у конструкції засобів захисту; дотриманням ергономічних вимог; включенням вимог безпеки в технічну документацію з монтажу, експлуатації; ремонту; транспортування та зберігання устаткування; використанням у конструкції устаткування безпечних та нешкідливих матеріалів.

Конструкції устаткування повинна забезпечувати захист людини від ураження електричним струмом, запобігати накопиченню статичної електрики в небезпечних кількостях.

Проблема підвищених рівнів температур та вологості повітря робочої зони може бути вирішена застосуванням як загальноцехової системи

вентиляції, так і локальних (місцевих) систем вентиляції та кондиціонування повітря.

Загальні методи боротьби з вібрацією класифікуються наступним чином [4]:

- зниження вібрацій в джерелі виникнення шляхом зниження або усунення збуджувальних сил;
- відлагодження від резонансних режимів раціональним вибором приведеної маси або жорсткості системи, котра коливається;
- вібродемпфірування – зниження вібрацій за рахунок сили тертя демпферного пристрою, тобто переведення коливної енергії в тепло;
- динамічне гасіння – введення в коливну систему додаткових мас або збільшення жорсткості системи;
- віброізоляція – введення в коливну систему додаткового пружного зв'язку, з метою послаблення передавання вібрацій, суміжному елементу конструкції або робочому місцю;
- використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Всі, хто працює з джерелами вібрації, повинні проходити медичні огляди перед вступом на роботу і періодично, не рідше 1 разу на рік.

Заходи та засоби захисту від шуму поділяються на колективні та індивідуальні [2, 3, 4], причому останні застосовуються лише тоді, коли заходами та засобами колективного захисту не вдається знизити рівні шуму на робочих місцях до допустимих значені, Призначення ЗІЗ від шуму – перекрити найбільш чутливі канали проникнення звуку в організм – вуха. Тим самим різко послаблюються рівні звуків, що діють на барабанну перетинку, а, відтак, і коливання чутливих елементів внутрішнього вуха. Такі засоби дозволяють одночасно попередити розлад і всієї нервової системи від дії інтенсивного подразника, яким є шум. До ЗІЗ від шуму належать навушники, протишумові вкладки, шумозаглушні шоломи. Вибір ЗІЗ обумовлюється видом та характеристикою шуму на робочому місці, зручністю використання засобу при виконанні даної робочої операції та конкретними кліматичними умовами.

Для захисту персоналу від впливу електромагнітних полів та іонізуючих випромінювань використовують різноманітні способи та засоби: зменшують напруженість та густину потоку випромінювання; екранують робочі місця; віддаляють робочі місця від джерела електромагнітного поля чи іонізуючого випромінювання; раціонально розміщують в робочому приміщенні обладнання, що випромінює; встановлюють раціональні режими роботи обладнання та обслуговуючого персоналу; застосовують засоби попереджувальної сигналізації, ЗІЗ.

Для запобігання шкідливим результатам недостатнього освітлення необхідна наявність раціонального освітлення приміщень та робочих місць. При проектуванні природного та штучного освітлення у виробничих та допоміжних будівлях і приміщеннях, а також штучного освітлення на території підприємства необхідно враховувати вимоги будівельних норм та правила щодо проектування природного та штучного освітлення, а також вимоги галузевих норм проектування освітлення, розроблених та затверджених у відповідності із встановленим порядком. Адже відомо, що 90 % всієї інформації про довкілля людина одержує через органи зору [3]. Світло впливає не лише на функцію органів зору, а й на діяльність організму в цілому. При поганому освітленні людина швидко втомлюється, працює менш продуктивно, зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Згідно із статистичними даними, до 5 % травм можна пояснити недостатнім або нераціональним освітленням, а в 20 % воно сприяло виникненню травм [3]. Врешті, погане освітлення може призвести до професійних захворювань, наприклад, короткозорості або спазму акомодатії.

Протипожежна профілактика передбачає заходи по попередженню та ліквідації пожеж, включаючи обмеження сфери розповсюдження вогню та забезпечення успішної евакуації людей та майна із приміщень, які горять. Розміщення й улаштування складів горючих та вибухонебезпечних речовин на території підприємства виконуються із врахуванням протипожежних вимог.

Регулярно повинні проводитися інструктажі з протипожежної безпеки і

загальнооб'єктові тренування з евакуації та уміння використовувати засоби пожежогасіння.

Для захисту працівників від біологічних факторів – вірусів, бактерій та алергенів рослинного і тваринного походження у виробничих приміщеннях застосовуються системи вентиляції та ЗІЗ – ватно-марлеві пов'язки, респіратори, протигази. Для захисту шкіряних покривів – спецодяг. Періодично і регулярно мають проводитись заходи з дезінфекції, дезінсекції, дератизації [2, 3].

Найбільш дієвим способом захисту від психофізіологічних небезпечних і шкідливих впливів на працівника є правильна організація його робочого часу та місця роботи. Мають бути раціонально сплановані робочі зміни й час відпочинку, надаватись технологічні та гігієнічні перерви, створюватись позитивний морально-психологічний клімат у трудовому колективі.

Одним з найбільш небезпечних виробничих факторів на сучасних підприємствах є можливість враження працівників електричним струмом, оскільки зазвичай використовується виробниче устаткування під стандартну електричну мережу $\sim 380(\sim 220)$ В, 50 Гц. Для забезпечення електробезпеки персоналу застосовують 3 методи [2, 3, 4]: захисне заземлення, захисне занулення, захисне відключення.

Кожен з цих методів може бути застосований як окремо, так і у поєднанні з іншими (в залежності від специфіки виробництва і наявної електробезпеки).

Для усунення шкідливого впливу електричного струму на працівників, розрахуємо захисне електричне заземлення допоміжного електрообладнання цеху, де відбувається використання випарних установок та їх систем керування.

Розрахунок захисного заземлення допоміжного електрообладнання цеху, в якому використовуються випарні установки та системи керування ними

Мета розрахунку захисного заземлення полягає у визначенні кількості електродів і заземлених провідників, їхніх розмірів і схеми розміщення в ґрунті, при яких опір заземлювального пристрою розтікання струму або напруги дотику, при замиканні фази на заземленій частині електроустановки, не перевищує допустимих значень. Розрахунок проводимо у відповідності з методикою, викладеною у [2, 4].

Початкові розрахункові дані:

1. Потужність допоміжного електрообладнання цеху $P = 5$ кВт;
2. Довжина труби вертикального заземлювача $l_{\text{в}} = 3$ м, довжина горизонтального заземлювача $l_{\text{г}} = 5$ м;
3. Глибина закладання вертикального та горизонтального заземлювача $h = 0,8$ м;
4. Допустимий опір $R_{\text{доп}} = 4$ Ом;
5. Ґрунт – піщаний.

Розрахунок.

1) Визначаємо $\rho_{\text{табл}}$ – приблизне значення питомого опору ґрунту, що рекомендується для розрахунку: $\rho_{\text{табл}} = 600$ Ом·м

2) Визначаємо $\kappa_{\text{с.в.}}$ – коефіцієнт сезонності для вертикальних заземлювачів. За таблицями [2, 4], приймаємо $\kappa_{\text{с.в.}} = 1,5$.

3) Визначаємо $\kappa_{\text{с.г.}}$ – коефіцієнт сезонності для горизонтального заземлювача. За таблицями [2, 4], приймаємо $\kappa_{\text{с.г.}} = 1,3$.

4) Визначаємо $\rho_{\text{розр.в.}}$ – розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикальних заземлювачів, Ом·м:

$$\rho_{\text{розр.в.}} = \rho_{\text{табл.}} \cdot \kappa_{\text{с.в.}} = 600 \cdot 1,5 = 900 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

5) Визначаємо t – відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача, м:

$$t = h_{\text{в}} + \frac{l_{\text{в}}}{2} = 0,8 + \frac{3}{2} = 2,3 \text{ м}.$$

6) Визначаємо $R_{\text{в}}$ – опір розтіканню струму в одному вертикальному

заземлювачі, Ом:

$$R_B = 0,366 \cdot \frac{\rho_{\text{розр.в.}}}{l_B} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot l_B}{d} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot t + l_B}{4 \cdot t - l_B} \right) =$$
$$= 0,366 \cdot \frac{900}{3} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 3}{0,03} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) = 269 \text{ Ом.}$$

7) Визначаємо $n_{\text{т.в.}}$ – теоретичну кількість вертикальних заземлювачів без урахування коефіцієнта використання $\eta_{\text{в.в.}}$ (тобто при $\eta_{\text{в.в.}} = 1$ шт.):

$$n_{\text{т.в.}} = \frac{R_B}{R_{\text{доп}} \cdot \eta_{\text{в.в.}}} = \frac{269}{4 \cdot 1} = 67 \text{ шт.}$$

8) Визначаємо $\eta_{\text{в.в.}}$ – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів: $\eta_{\text{в.в.}} = 0,38$.

9) Визначаємо $n_{\text{н.в.}}$ – необхідну кількість вертикальних однакових заземлювачів, з урахуванням коефіцієнта використання, шт:

$$n_{\text{н.в.}} = \frac{R_B}{R_d \cdot \eta_{\text{в.в.}}} = \frac{269}{4 \cdot 0,38} = 177 \text{ шт.}$$

10) Визначаємо $R_{\text{розр.в.}}$ – розрахунковий опір розтіканню струму у вертикальних заземлювачах при $n_{\text{н.в.}} = 177$ шт., без урахування з'єднувальної стрічки, Ом:

$$R_{\text{розр.в.}} = \frac{R_B}{n_{\text{н.в.}} \cdot \eta_{\text{в.в.}}} = \frac{269}{177 \cdot 0,38} = 4 \text{ Ом.}$$

11) Визначаємо L_B – відстань між вертикальними заземлювачами, за відношенням:

$$\frac{L_B}{l_B} = 1.$$

Звідси:

$$L_B = 1 \cdot l_B = 1 \cdot 3 = 3 \text{ м.}$$

12) Визначаємо $L_{\text{з.с.}}$ – довжина з'єднувальної стрічки горизонтального

заземлювача, м:

$$L_{3.с.} = 1,05 \cdot L_B \cdot (n_{H.B.} - 1) = 1,05 \cdot 3 \cdot (177 - 1) = 554 \text{ м.}$$

13) Визначаємо $R_{г.з.с.}$ – опір розтіканню струму в горизонтальному заземлювачі (з'єднувальній стрічці), Ом:

$$R_{г.з.с.} = 0,366 \cdot \frac{\rho_{розр.г.}}{L_{3.с.}} \cdot \lg \frac{2L_{3.с.}^2}{h_3 \cdot b_c} = 0,366 \cdot \frac{780}{554} \cdot \lg \frac{2 \cdot 554^2}{0,8 \cdot 0,03} = 4 \text{ Ом.}$$

14) Визначаємо $\eta_{в.г.}$ – коефіцієнт використання горизонтального заземлювача: $\eta_{в.г.} = 0,19$.

15) Визначаємо $R_{розр.г.}$ – розрахунковий опір розтіканню струму в горизонтальному заземлювачі, при кількості електродів $n_{г.} = 1$ шт., Ом:

$$R_{розр.г.} = \frac{R_{г.з.с.}}{n_{г.} \cdot \eta_{в.г.}} = \frac{4}{1 \cdot 0,19} = 22 \text{ Ом.}$$

16) Визначаємо $R_{розр.в.г.}$ – розрахунковий теоретичний опір розтіканню струму у вертикальному та горизонтальному заземлювачах, Ом:

$$R_{розр.в.г.} = \frac{1}{\frac{1}{R_{розр.в.}} + \frac{1}{R_{розр.г.}}} = \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{1}{22}} = 3,4 \text{ Ом.}$$

Або

$$R_{розр.в.г.} = \frac{R_{розр.в.} \cdot R_{розр.г.}}{R_{розр.в.} + R_{розр.г.}} = \frac{4 \cdot 22}{4 + 22} = 3,4 \text{ Ом.}$$

Виконується умова:

$$R_{розр.в.г.} < R_{доп} \quad \text{або} \quad 3,4 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом,}$$

а, значить, захисне заземлення розраховане вірно і буде виконувати своє призначення.

Схема розміщення в ґрунті горизонтальних та вертикальних заземлювачів захисного заземлення допоміжного електрообладнання цеху, в якому використовуються випарні установки та системи керування ними,

наведена на *рис. 1*.

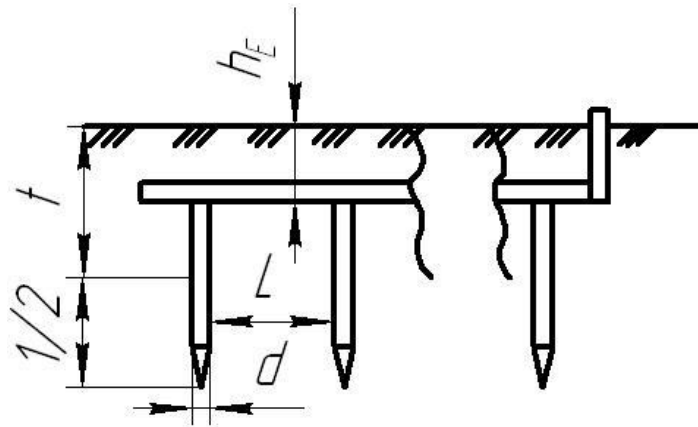


Рисунок 1 – Схема розміщення в ґрунті горизонтальних та вертикальних заземлювачів захисного заземлення допоміжного електрообладнання цеху