

УДК 628.194:628.196:66.097.8

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.281221.62.815

## ОСНОВНІ ФАКТОРИ, ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО ЗНИЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ОБОРОТНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ

НЕЧИТАЙЛО М. П.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,

НАГОРНА О. К.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

НЕСТЕРОВА О. В.<sup>3\*</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, +38 (056) 756-34-74, e-mail: [nicknechitaylo@gmail.com](mailto:nicknechitaylo@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

<sup>2</sup> Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 4600, Україна, +38 (056) 756-34-74, e-mail: [nahorna.olena@pgasa.dp.ua](mailto:nahorna.olena@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-4027-9336

<sup>3\*</sup> Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, +38 (056) 756-34-74, e-mail: [melenanesterenko@gmail.com](mailto:melenanesterenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Основні питання, що виникають під час експлуатації водооборотних систем охолодження – це погіршення теплотехнічних та гідравлічних характеристик, а також корозійні процеси, що призводять до підвищення експлуатаційних витрат на заміну частин обладнання та трубопроводів. Це зумовлено як з вхідними параметрами пов'язаними з якістю води, так і експлуатаційними параметрами системи, пов'язаними з коефіцієнтами випарювання та різницею температур у контурі. *Методи.* Дослідження виконані на підставі аналізу українських і зарубіжних наукових джерел і звітних даних про специфіку експлуатації систем оборотного водопостачання. Вплив різних факторів на режим роботи системи вивчено в результаті проведених власних досліджень. *Наукова новизна.* Проведено аналіз впливу визначальних факторів на роботу системи оборотного водопостачання. Визначено керуючий фактор у забезпеченні надійності роботи системи оборотного водопостачання. *Практична значимість.* Теоретичні викладки є важливими з огляду на те, що компанії, які займаються процесами охолодження, як правило, не мають у своєму штаті інженера, який би розбирався в процесах очищення води. Інженери проектувальники теплотехнічної частини проектів не навчаються за даною тематикою і також не розуміють проблему, пов'язану з відсутністю належної підготовки води. *Висновки.* Велика кількість факторів, що зумовлюють надійність випарних систем охолодження, показує складність прогнозування та розрахунку її безаварійної роботи. До основних факторів, що зумовлюють надійність роботи випарних систем охолодження можна віднести хімічний склад води, температурні режими та продування. Продування може бути прийняте за керуючий фактор при експлуатації оборотної системи, але саме по собі продування зазвичай не може запобігти утворенню накипу, так як деякі сполуки перевищують рівень насичення і осідають на теплообмінних поверхнях та інших внутрішніх пристроях системи. Для забезпечення надійності роботи систем у більшості випадків потрібна додаткова обробка води хімічними або фізичними методами.

**Ключові слова:** оборотна система охолодження; продування; утворення накипу; корозія; мікробіологічне обростання

## MAIN FACTORS WHICH LEAD TO REDUCING THE RELIABILITY OF REVERSE COOLING SYSTEMS

NECHYTAILO M.P.<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

NAHORNA O.K.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

NESTEROVA O.V.<sup>3\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), assoc. Prof.

<sup>1</sup> Department of Water Supply, Water Disposal and Hydraulics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [nicknechitaylo@gmail.com](mailto:nicknechitaylo@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

<sup>2</sup> Department of Water Supply, Water Disposal and Hydraulics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [nahorna.olena@pgasa.dp.ua](mailto:nahorna.olena@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-4027-9336

<sup>3\*</sup> Department of Water Supply, Water Disposal and Hydraulics, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-74, e-mail: [melenanesterenko@gmail.com](mailto:melenanesterenko@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

**Abstract. Problem statement.** The main issues that arise during the operation of circulating cooling systems are the deterioration of thermal and hydraulic characteristics, as well as corrosion processes that lead to increased operating costs for the replacement of equipment and pipelines. This is due to both the input parameters related to water quality and the operating parameters of the system related to the evaporation coefficients and the temperature difference in the circuit. **Methods.** The research was performed on the basis of the analysis of Ukrainian and foreign scientific sources and reporting data on the specifics of the operation of circulating water supply systems. The influence of various factors on the mode of operation of the system has been studied as a result of our own research. **Scientific novelty.** The analysis of influence of determining factors on work of system of circulating water supply is carried out. The controlling factor in ensuring the reliability of the circulating water supply system is determined. **Practical significance.** Теоретичні викладки є важливими з огляду на те, що компанії, які займаються процесами охолодження, як правило, не мають у своєму штаті інженера, який би розбирався в процесах очищення води. Інженери проектувальники теплотехнічної частини проектів не навчаються за даною тематикою і також не розуміють проблему, пов'язану з відсутністю належної підготовки води. **Conclusion.** A large number of factors that determine the reliability of evaporative cooling systems, shows the complexity of forecasting and calculating its trouble-free operation. The main factors that determine the reliability of evaporative cooling systems include the chemical composition of water, temperature and purge. Blowing can be taken as a control factor in the operation of the reversible system, but the purge itself usually can not prevent the formation of scale, as some compounds exceed the saturation level and settle on heat exchange surfaces and other internal devices of the system. To ensure the reliability of the systems in most cases requires additional water treatment by chemical or physical methods.

**Keywords:** *reversible cooling system; scavenging; scaling; corrosion; microbiological fouling*

**Постановка проблеми.** У промислових системах охолодження найчастіше в якості теплоносія використовується вода. Це пов'язано з тим, що вода доступна, має хороші теплотехнічні властивості, і навіть забезпечує найменші експлуатаційні витрати. Однак при експлуатації водооборотних систем охолодження виникають проблеми, пов'язані з тим, що вода також містить розчинені солі і гази, розчинені органічні речовини, які призводять до відкладень і корозії. Одним із додаткових факторів, що знижують ефективність роботи систем охолодження, є біологічне обростання [1]. Прогнозування роботи таких систем залежить від якості вихідної води і має враховувати безліч параметрів. Для кожного контуру охолодження та джерела води експлуатаційні проблеми обумовлюватимуться своїми залежностями. У даній статті ми постараємося узагальнити основні фактори, які дозволять прогнозувати системи випарного охолодження з урахуванням якості води для підживлення, а також розглянемо основні причини порушення роботи системи охолодження.

**Методи.** Дослідження виконані на підставі аналізу українських і зарубіжних наукових джерел і звітних даних про специфіку експлуатації систем оборотного водопостачання. Вплив різних факторів на режим роботи системи вивчено в результаті проведених власних досліджень.

**Наукова новизна.** Проведено аналіз впливу визначальних факторів на роботу системи оборотного водопостачання. Визначено керуючий фактор у забезпеченні надійності роботи системи оборотного водопостачання.

**Практична значимість.** Теоретичні викладки є важливими з огляду на те, що компанії, які займаються процесами охолодження, як правило, не мають у своєму штаті інженера, який би розбирався в процесах очищення води. Інженери проектувальники теплотехнічної частини проектів не навчаються за даною тематикою і також не розуміють проблему, пов'язану з відсутністю належної підготовки води.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У процесі роботи системи оборотного водопостачання та відведення тепла частина води випаровується і виноситься в атмосферу. Втрати води в

системі поповнюються підживлювальною водою. Випаровується вода практично без солей, що призводить до підвищення концентрації солей в оборотній системі водопостачання, до утворення пересичених розчинів та випадання частини солей у

вигляді осадів. На рисунку 1 представлена типова система циркуляційного зворотного охолодження з використанням градирні. При експлуатації такої системи необхідно чітко виділяти параметри, які призводять до корозії та осадоутворення.

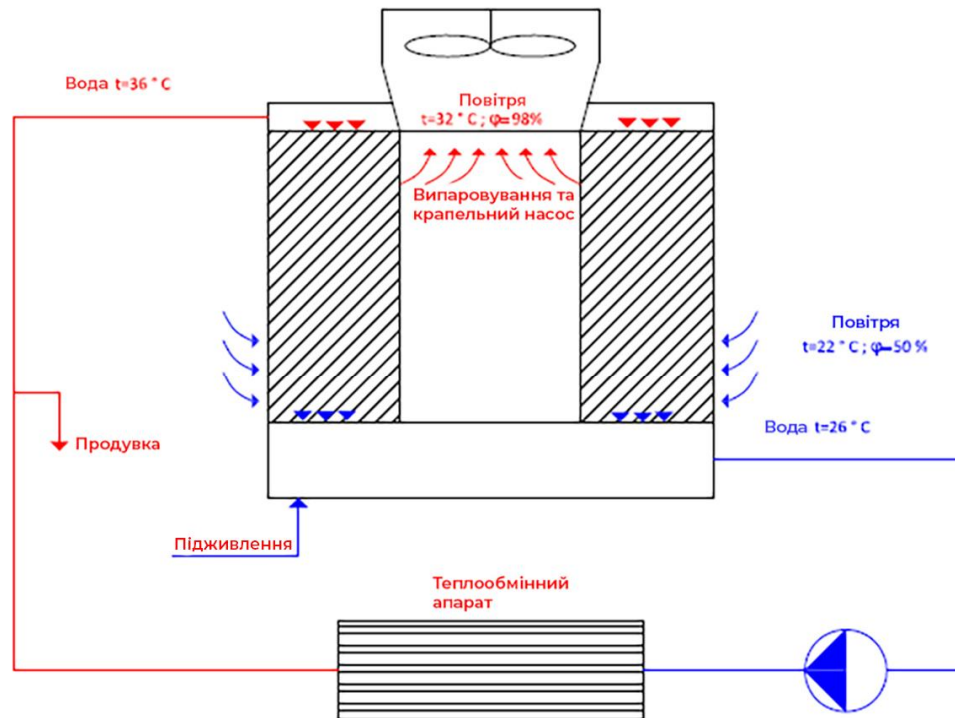


Рис. 1. Типова система циркуляційного зворотного охолодження з використанням градирні

У процесі роботи системи випарного охолодження можна виділити чотири основні проблеми, які пов'язані з водним контуром: корозію, утворення накипу, біологічне обростання нерозчинними частинками, мікробіологічне обростання.

Корозія в оборотних системах охолодження визначається руйнуванням металу внаслідок хімічної чи електрохімічної реакції з доквіллям [2]. Корозія спричиняє дві основні проблеми. Перша і найбільш очевидна – це відмова обладнання, що призводить до витрат на заміну та простою обладнання. Друга, зниження ефективності роботи установки через втрату теплопередачі – результат забруднення теплообмінника накопиченими продуктами корозії. Корозія виникає на аноді, де розчиняється метал. Часто він відділений фізичною відстанню від катода, де відбувається реакція відновлення. Між

цими ділянками існує різниця електричних потенціалів і струм тече через розчин від анода до катода. Процес супроводжується потоком електронів від анода до катода через метал. Відповідно, чим більше солей розчинено в оборотній воді, тим інтенсивніше протікають процеси корозії.

Утворення накипу відбувається в результаті осадження та зростання кристалів на поверхні, що контактує з водою. Осадження відбувається, коли розчинність перевищена або обсягом води, або поверхні. Найбільш поширені солі, що утворюють накип, які відкладаються на поверхнях теплопередачі, це солі, що мають ретроградну розчинність з температурою. Хоча вони можуть бути повністю розчинені у воді з нижчою температурою, ці сполуки (наприклад, карбонат кальцію, фосфат кальцію та силікат магнію) перенасичуються у воді з більш високою

температурою, що прилягає до поверхні теплопередачі, і осаджуються на поверхні.

Утворення накипу не завжди пов'язане з температурою. Відкладення карбонату кальцію і сульфату кальцію утворюються не на поверхнях, що нагріваються, в тому випадку, коли їх розчинність перевищує критичну в обсязі води. Металеві поверхні є ідеальним місцем для зародження кристалів через їхню шорсткість і малі швидкості, що прилягають до поверхні. Додатково комірки корозії на поверхні металу створюють ділянки з високим рН, які сприяють осадженню багатьох солей охолоджуючої води. Після утворення, відкладення накипу ініціюють додаткове зародкоутворення, і зростання кристалів відбувається зі збільшеною швидкістю.

Обростання в системах охолодження відбувається, коли нерозчинні частинки, зважені в циркулюючій воді, утворюють відкладення на поверхні. У механізмах забруднення переважають взаємодії частинок, що призводять до утворення агломератів. При низьких швидкостях води осадження часток відбувається під впливом сили тяжіння. Параметри, що впливають на швидкість осадження - розмір часток, відносна швидкість рідини та часток, а також в'язкість рідини. Зв'язок цих змінних виражається законом Стокса [3]. Найбільш важливим фактором, що впливає на швидкість осадження, є розмір частинки. З цієї причини контроль забруднення шляхом запобігання агломерації є одним із найбільш фундаментальних аспектів контролю відкладень. Забруднюючі речовини потрапляють у систему охолодження з підживлювальною водою, повітряними забрудненнями, технологічними витоками та корозією. Більшість потенційних забруднювачів потрапляє з водою для підживлення у вигляді твердих частинок, таких як глина, мул і оксиди заліза. Нерозчинні гідроксиди алюмінію та заліза потрапляють у систему після операцій попереднього очищення підживлювальної води. Деякі підземні води містять високі рівні розчинного двовалентного заліза, яке пізніше окислюється до тривалентного

заліза розчинним киснем у рециркуляційній охолоджуючій воді. Оскільки воно має низьку розчинність, тривалентне залізо осаджується. Процес корозії сталі також є джерелом двовалентного заліза і, отже, сприяє забрудненню води. І залізо, і алюміній викликають особливі проблеми через їхню здатність діяти в якості коагулянтів. Крім того, їх розчинні та нерозчинні гідроксидні форми можуть викликати осадження деяких реагентів для обробки води, таких як ортофосфати.

Забруднюючі речовини, що переносяться повітрям, зазвичай складаються з частинок глини і бруду, але можуть включати такі гази, як сірководень, який утворює нерозчинні осади з іонами багатьох металів. Витоки, що виникають у процесі виробництва, призводять до появи різних забруднюючих речовин, які прискорюють осадження та корозію.

Системи водяного охолодження, особливо відкриті рециркуляційні системи, створюють сприятливе середовище для зростання мікроорганізмів [4]. Зростання мікробів на змочених поверхнях призводить до утворення біоплівки. При неконтрольованому впливі такі плівки викликають обростання, яке може негативно позначитися на роботі обладнання, сприяти корозії. Ці проблеми можна контролювати за допомогою належного біомоніторингу та застосування відповідних біоцидних препаратів для циркулюючої води в системах охолодження.

Біоплівки зазвичай представляють собою сукупність біологічних і небіологічних матеріалів. Біологічний компонент, відомий як біоплівка, складається з мікробних клітин та їх побічних продуктів. Переважний побічний продукт, позаклітинна полімерна речовина, є сумішшю гідратованих полімерів. Ці полімери утворюють гелеподібну мережу навколо клітин та сприяють прикріпленню до поверхонь. Небіологічні компоненти можуть бути органічними або неорганічними залишками багатьох джерел,

які адсорбувалися або впроваджувалися в полімер біоплівки.

Біоплівки можуть утворюватися у прямооточних та циркуляційних системах. На деяких ділянках слиз може сприяти зниженню ефективності теплопередачі або зменшенню потоку води. Мікробна активність під відкладеннями або всередині шламів може прискорити швидкість корозії і навіть пробити поверхню теплообмінника

Оцінка основних факторів, що зумовлюють відкладення та корозію в системах випарного охолодження з точки зору хімічного складу води визначається за допомогою показників лужності, рН, жорсткості, вмісту кальцію, провідність, загальна кількість розчинених твердих солей, вміст зважених речовин, вміст хлоридів, температура води, наявність мікробіологічного забруднення, індекс стабільності (насичення), коефіцієнт випаровування та продування.

Лужність характеризує кількість розчинених лужноземельних металів у формі бікарбонатів та карбонатів, які у поєднанні з кальцієм та магнієм утворюють карбонат кальцію та карбонат магнію. Відстеження цього показника дозволяє прогнозувати роботу системи охолодження в режимі утворення накипу або в безнакипному режимі.

Вимірювання водневого показника є одним з найважливіших факторів, що впливають на утворення накипу або корозії в системі охолодження. Значення рН води визначає, чи буде викликати жорстка вода утворення накипу або корозію. Води з низьким  $\text{pH} \leq 7$  мають тенденцію викликати корозію, тоді як води з високим рН можуть викликати утворення накипу.

Жорсткість: основний показник, який показує кількість солей кальцію, магнію, заліза та кількостей інших металевих елементів у воді.

Кальцій у перерахунок на карбонати –  $\text{CaCO}_3$ .

При проектуванні та прогнозуванні роботи системи охолодження при визначенні вмісту кальцію у воді необхідно спиратися на вимірювання кількості кальцію

уперерахунку на  $\text{CaCO}_3$  мг/л, а не на загальну жорсткість. Так, наприклад, вода, що містить 200 мг/л  $\text{CaCO}_3$  при рН 9 або вище, вже здатна до утворення накипу. Таким чином, щоб уникнути процесів утворення накипу необхідно контролювати кількість солей кальцію та загальну жорсткість одночасно, що дає повну картину про стан системи.

Провідність та загальна кількість розчинених твердих солей безпосередньо пов'язані між собою. Провідність – це міра можливості розчину проводити електрику, тобто, що більше солей розчинено у питній воді то вище її електропровідність. Вимірювання провідності дає вам гарне уявлення про загальну кількість розчинених твердих речовин – солей. Розчинені солі у воді при пересиченні агломеруються і формують нерозчинні мінеральні відкладення на поверхнях теплопередачі.

Зважені речовини – це дрібнодисперсні органічні та неорганічні речовини, що містяться у воді, які можуть бути центрами кристалізації. Таке чвище викликане глинистим мулом та мікроскопічними організмами, які розпорошені по всій воді, надаючи їй каламутного вигляду.

Хлориди – це загальна кількість розчинених хлоридних солей натрію, калію, кальцію та магнію, присутніх у воді. Хлориди зазвичай не сприяють утворенню накипу, оскільки вони дуже добре розчиняються. Однак хлориди викликають корозію, коли присутні у великому обсязі. Також по хлоридам найбільш точно можна визначити, які процеси протікають у системи з точки зору утворення накипу, шляхом оцінки коефіцієнта упарювання.

Мікробіологічне забруднення охолоджувальних систем є результатом рясного зростання водоростей, грибів та бактерій на поверхнях. Прямоточні і відкриті або закриті системи рециркуляції води можуть підтримувати зростання мікробів, але проблеми забруднення зазвичай розвиваються швидше і більші у відкритих системах рециркуляції. Води прямооточних систем зазвичай містять відносно низькі рівні поживних речовин,

необхідні для зростання мікробіології, тому зростання відбувається повільно. Відкриті рециркуляційні системи підхоплюють мікроорганізми з повітря, а шляхом випаровування концентруються поживні речовини, присутні у підживлювальній воді. Внаслідок цього мікробіологічне обростання відбувається дуже швидко. Витоки з технологічних процесів можуть ще більше збільшувати кількість поживних речовин в охолоджувальній воді.

Крім наявності органічних і неорганічних поживних речовин, такі фактори, як температура, нормальний діапазон регулювання рН і постійна аерація циркулюючої води сприяють створенню середовища, ідеального для зростання мікробів. Також присутність сонячного світла призводить до зростання водоростей. В результаті можуть розвиватися великі та різноманітні мікробні популяції. Результатом неконтрольованого зростання мікробіології на поверхні є утворення слизу.

Результатом неконтрольованого зростання мікробів на поверхні є утворення слизу. «Слиз» зазвичай представляє собою сукупність біологічних і небіологічних матеріалів. Біологічний компонент, відомий як біоплівка, складається з мікробних клітин та їх побічних продуктів. Переважний побічний продукт, позаклітинна полімерна речовина (EPS), є сумішшю гідратованих полімерів [5]. Ці полімери утворюють гелеподібну мережу навколо клітин та, мабуть, сприяють прикріпленню до поверхонь. Небіологічні компоненти можуть бути органічними або неорганічними залишками багатьох джерел, які адсорбувалися або впроваджувалися в полімер біоплівки.

Температура системи охолодження [6] впливає на насичення газами води, і навіть процеси утворення накипу. Також від різниці температур у контурі між входом на теплообмінному пристрої та виходом залежить швидкість випаровування рідини, а відповідно і коефіцієнт концентрування солей або коефіцієнт упарювання.

Індекс насичення або індекс стабільності: Індекс насичення води або

Індекс насичення Ланжером (LSI) [7; 8] це розрахунковий показник стабільності води по відношенню до утворення накипу, який дозволяє враховувати такі параметри як хімічний склад води та температуру. Коли показання LSI позитивні, вода має тенденцію до утворення накипу, а коли показання негативні, вода має схильність до корозії. Зазвичай показання в межах від нуля до одиниці вважаються стабільними.

Коефіцієнт випарювання та продування системи [9] характеризує систему з точки зору збільшення концентрування солей, тобто у скільки разів відбулося випарювання води. Чим більший такий коефіцієнт, тим вища ймовірність осадження в системах солей та перебігу процесів корозії. Цей коефіцієнт прямо пов'язаний також зі скиданням частини води з системи - продуванням, яким можна регулювати концентрацію солей. Незалежно від джерела підживлення на установках з градирнями передача тепла теплої води теплообмінника в основному відбувається за рахунок випаровування в градирні. Звичайно, це призводить до зростання концентрації домішок в обсязі води. Продування це поширений метод запобігання накопиченню надлишків розчинених твердих частинок. Зниження концентрації солей у системі відбувається за рахунок скидання частини солоної води із системи та поповнення її свіжою підживлювальною.

**Висновки.** Велика кількість факторів, що зумовлюють надійність випарних систем охолодження, показує складність прогнозування та розрахунку її безаварійної роботи. До основних факторів, що зумовлюють надійність роботи випарних систем охолодження можна віднести хімічний склад води, температурні режими та продування. Як правило, на перші два ми впливати не можемо. Третій фактор – продування – може бути прийнятий за керуючий в оборотній системі, але саме по собі продування зазвичай не може запобігти утворенню накипу, так як деякі сполуки перевищують рівень насичення і осідають на теплообмінних поверхнях та інших

внутрішніх пристроях системи. Таким чином, для забезпечення надійності роботи систем у більшості випадків потрібна додаткова обробка води хімічними або фізичними методами.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cooling Water Treatment for Industrial Cooling Water Systems. URL: [https://www.ecolab.com/solutions/cooling-water-treatment#f:@websolutions=\[Cooling%20Water%20Treatment\]&f:@webapplications=\[Water%20Treatment\]](https://www.ecolab.com/solutions/cooling-water-treatment#f:@websolutions=[Cooling%20Water%20Treatment]&f:@webapplications=[Water%20Treatment]) (дата звернення: 12.12.2021).
2. Safari F., Zamanpour A., Reihany A., Farah S., Farahbod F. Prevent Corrosion in Cooling Towers: Finding the Optimum Amount of Makeup Water and the Outlet Water Stream. *European Journal of Technology and Design*. 2015. Vol. (7), iss. 1. Pp. 4–11. DOI: 10.13187/ejtd.2015.7.4
3. Эткинс П., де Паула Дж. Физическая химия. Ч. 1. Равновесная термодинамика: учеб. Москва: Мир, 2007. 494 с.
4. The Cooling Water Handbook: a basic guide to understanding industrial cooling water systems and their treatment. URL: <https://www.buckman.com/wp-content/uploads/2018/04/w961a4-coolingwaterhandbook.pdf> (дата звернення: 12.12.2021).
5. Ceyhan N., Ozdemir G. Extracellular polysaccharides produced by cooling water tower biofilm bacteria and their possible degradation. *Biofouling*. 2008. № 24 (2). Pp. 129–135. URL: <https://doi.org/10.1080/08927010801911316>.
6. Рушников А. Ю. Влияние аэрации на углекислотное равновесие в воде. Ч. 2. *Журнал С.О.К.* 2016. № 2. С. 30–35. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/o-nekotoryh-osobennostyah-rascheta-indeksa-stabilnosti-vody-lanzhele> (дата звернення: 12.12.2021).
7. Zhang L., Theregowda R. B., Small M. J. Statistical Model for Scaling and Corrosion Potentials of Cooling-System Source Waters. *Environmental Engineering Science*. 2014. Vol. 31 (10). Pp. 570–581. URL: <https://doi.org/10.1089/ees.2014.0196>.
8. Langelier Saturation Index Calculator. URL: <https://www.lenntech.com/calculators/langelier/index/langelier.htm> (дата звернення: 12.12.2021).
9. Evaporation and Water Usage. BASIC THEORY AND PRACTICE. URL: <https://www.spxcooling.com/wp-content/uploads/AE-AS-24-1.pdf> (дата звернення: 12.12.2021).

### REFERENCES

1. Cooling Water Treatment for Industrial Cooling Water Systems. URL: [https://www.ecolab.com/solutions/cooling-water-treatment#f:@websolutions=\[Cooling%20Water%20Treatment\]&f:@webapplications=\[Water%20Treatment\]](https://www.ecolab.com/solutions/cooling-water-treatment#f:@websolutions=[Cooling%20Water%20Treatment]&f:@webapplications=[Water%20Treatment]) (date of application: 12.12.2021).
2. Safari F., Zamanpour A., Reihany A., Farah S. and Farahbod F. Prevent Corrosion in Cooling Towers: Finding the Optimum Amount of Makeup Water and the Outlet Water Stream. *European Journal of Technology and Design*. 2015, vol. 7, iss. 1, pp. 4–11. DOI: 10.13187/ejtd.2015.7.4.
3. Atkins P. and de Paula J. Physical chemistry. P. 1. Equilibrium thermodynamics: textbook. Moscow: Mir Publ., 2007, 494 p. (in Russian).
4. The Cooling Water Handbook A basic guide to understanding industrial cooling water systems and their treatment. URL: <https://www.buckman.com/wp-content/uploads/2018/04/w961a4-coolingwaterhandbook.pdf> (date of application: 12.12.2021).
5. Ceyhan N. and Ozdemir G. Extracellular polysaccharides produced by cooling water tower biofilm bacteria and their possible degradation. *Biofouling*. 2008, vol. 24 (2), pp. 129–135. URL: <https://doi.org/10.1080/08927010801911316>.
6. Rushnikov A.Yu. *Vliyaniye aeratsii na uglekislotnoye ravnovesiye v vode* [Influence of aeration on carbon dioxide equilibrium in water]. P. 2. *Zhurnal S.O.K.* [Journal of S.O.K.]. 2016, no. 2, pp. 30–35. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/o-nekotoryh-osobennostyah-rascheta-indeksa-stabilnosti-vody-lanzhele> (date of application: 12.12.2021) (in Russian).
7. Zhang L., Theregowda R.B. and Small M.J. Statistical Model for Scaling and Corrosion Potentials of Cooling-System Source Waters. *Environmental Engineering Science*. 2014, vol. 31 (10), pp. 570–581. URL: <https://doi.org/10.1089/ees.2014.0196>.
8. Langelier Saturation Index Calculator. URL: <https://www.lenntech.com/calculators/langelier/index/langelier.htm> (date of application: 12.12.2021).
9. Evaporation and Water Usage. BASIC THEORY AND PRACTICE. URL: <https://www.spxcooling.com/wp-content/uploads/AE-AS-24-1.pdf> (date of application: 12.12.2021).

Надійшла до редакції: 03.12.2021.