

АНАЛІТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ВІДКЛАДЕНЬ НА ТЕПЛООБМІННИХ ПОВЕРХНЯХ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛООБМІНУ

¹Харківський національний університет Повітряних Сил України імені Івана Кожедуба

²Вінницький національний технічний університет

Енергозбереження є одним із пріоритетних напрямів державної політики України в енергетичній галузі. Цей курс охоплює не лише впровадження інноваційних енергоощадних технологій, але й глибоку модернізацію наявних виробничих потужностей шляхом заміни застарілих технологічних схем та обладнання на новітні, високоефективні рішення. Особливу увагу приділяють використанню пластинчастих теплообмінників нового покоління (ПТА), які вирізняються високими теплотехнічними, технологічними та експлуатаційними характеристиками.

Висока ефективність цих теплообмінників сприяє оптимізації енергоспоживання та підвищенню загальної економічної рентабельності підприємств. Розрахунки їхніх теплових і гідравлічних показників ґрунтуються на фундаментальних принципах гідродинаміки та теплообміну і є добре розробленими. Це дає змогу інженерам точно підбирати поверхні теплообміну відповідно до заданих витрат і температур теплоносія. Водночас, експлуатаційний досвід показує, що теоретично розрахована площа теплопередачі може потребувати збільшення на 20–200% через необхідність урахування додаткового термічного опору, зумовленого утворенням шару відкладень.

Однак, на сьогодні дані про термічний опір відкладень мають переважно рекомендаційний і розрізнений характер, що ускладнює їхнє практичне застосування. Вони часто не враховують специфіку конструкцій теплообмінників та умов їхньої експлуатації, а іноді навіть суперечать одне одному. Це стосується як промислових теплоносіїв, так і води – найпоширенішого з них. Забруднення поверхонь теплообміну суттєво знижує ефективність роботи ПТА в різних галузях, включаючи транспорт, енергетику, технологічні процеси та комунальну сферу. Утворення відкладень на теплообмінній поверхні призводить до зростання витрат електроенергії на перекачування теплоносія, зміни температурного режиму і, як наслідок, до збільшення як капітальних, так і експлуатаційних витрат. У критичних випадках це може спричинити вихід з ладу теплообмінника через блокування каналів.

Враховуючи зазначене, наукові дослідження, спрямовані на забезпечення довготривалого збереження проектних характеристик теплопередачі, набувають особливої актуальності. Їхньою метою є розробка обґрунтованих теоретичних засад і практичних рекомендацій, які дозволять мінімізувати негативний вплив забруднень на функціонування теплообмінників, сприяючи підвищенню їхньої надійності та ефективності.

Ключові слова: теплообмін; відкладення; термічна ефективність; аналітичний огляд; моделі утворення відкладень; методи очищення поверхонь; інноваційні технології захисту; продуктивність систем.

Вступ

В Україні енергозбереження є одним із пріоритетних напрямів державної політики в енергетичній сфері. Поряд із впровадженням новітніх енергозберігаючих технологій передбачається модернізація існуючих виробничих потужностей шляхом реконструкції, що включає заміну технологічних схем та обладнання на енергозберігаючі аналоги. Одним із ключових інструментів реалізації таких заходів є впровадження пластинчастих теплообмінників (пластинчастих теплообмінних апаратів) нового покоління (ПТА), які відзначаються високими теплотехнічними, технологічними та експлуатаційними характеристиками.

Методи теплового і гідравлічного розрахунку ПТА засновані на основах гідродинаміки та теплообміну і є добре опрацьованими. Це дозволяє без труднощів проводити розрахунки й підбір поверхонь теплообміну для заданих параметрів витрат теплоносія та температур. Проте розрахункове значення поверхні теплопередачі, отримане за такими методами, може збільшуватися на 20–200% на основі експлуатаційних даних, враховуючи відхилення і додавання рекомендованих констант термічного опору шару відкладень.

На сьогодні інформація про термічний опір відкладень має рекомендаційний характер, є фрагментарною, слабо систематизованою, не враховує специфіку поверхні теплообміну й умов експлуатації та інколи є суперечливою. Це стосується навіть такого поширеного теплоносія, як вода.

Проблема забруднення поверхонь теплообміну однаково актуальна для транспортних, енергетичних, технологічних теплообмінників, а також для обладнання муніципальної енергетики. Зважаючи на те, що вже на етапі розрахунку і підбору поверхні теплообмінника її розмір може бути значно збільшеним для забезпечення стабільності характеристик в умовах експлуатації, виникають численні ускладнення. В процесі експлуатації відкладення на поверхні теплообміну призводять до

підвищення споживання електроенергії для перекачування теплоносіїв, змінюють температурний режим, збільшують капітальні та експлуатаційні витрати. Необхідно також враховувати ризик виходу з ладу ПТА через засмічення каналів.

Саме тому актуальними є дослідження, спрямовані на розробку теоретичних основ та практичних рекомендацій щодо збереження проєктного значення теплопередачі навіть за умов забруднення поверхні теплообміну.

Мета роботи полягає у розробці теоретичних основ та практичних рекомендацій для забезпечення збереження проєктного значення теплопередачі пластинчастих теплообмінників (ПТА) за умов їх забруднення. Дане дослідження також спрямоване на вивчення вирішення проблем, пов'язаних із утворенням шарів відкладень на теплообмінній поверхні, які впливають на ефективність роботи теплообмінників, збільшують витрати електроенергії, змінюють температурний режим та підвищують капітальні й експлуатаційні витрати. Таким чином, це дослідження акцентує увагу на підвищенні надійності та ефективності роботи ПТА в різних галузях.

Результати роботи

Швидкість теплопередачі працюючого теплообмінника в динаміці може істотно відрізнятись від розрахункового значення. Однією з основних причин зниження інтенсивності теплопередачі є відкладення на поверхні теплообміну різного роду забруднень, які забезпечують додатковий опір теплопередачі.

До якої б конструкції не належав теплообмінник, він має цілком певні статистичні характеристики, які розраховуються з достатнім ступенем точності на основі добре розроблених і багаторазово перевірених методів теорії теплопередачі [6, 7, 8 -12, 20 - 22].

Існує підхід, згідно з яким більшість видів силових і технологічних ТА характеризуються відносно повільним перебігом процесу теплообмінника, функціонують в незначно мінливих умовах і при практично постійних навантаженнях, у зв'язку з чим проблема динаміки для таких пристроїв не виникає [41]. Однак якщо під динамікою процесу розуміти зміну в часі вихідних параметрів під впливом будь-яких факторів, то перераховані групи ТА слід віднести до динамічних об'єктів, а одним з істотних факторів, що впливають на його теплогідрравлічні характеристики, є змінний в часі термічний опір шару відкладень на поверхні теплообміну. Причому вплив цього фактора може бути настільки значним, що зводить нанівець переваги найбільш ефективних теплообмінників.

При виборі ТА важливе значення має оцінка термічного опору можливих забруднень, так як саме термічний опір теплопередачі визначає ефективність роботи теплообмінника. Існує практика [1, 7, 13, 18], коли з метою компенсації термічного опору утворюються забруднень розрахункову поверхню збільшують на 10...15 %, а іноді і до 50 %. Це тягне за собою виділення додаткової теплообмінної поверхні, матеріалом якої, як правило, є алюміній, мідь, леговані сталі. Крім того, збільшення поверхні неминує призводить до збільшення потужності для перекачування теплоносіїв, вартості теплообмінників, що відбивається на собівартості продукції і збільшенні терміну окупності нового теплообмінного обладнання.

На даний час можливості поліпшення теплогідрравлічних характеристик технологічних теплообмінників в значній мірі вичерпані. Однак залишається актуальною задача зниження енергоємності виробів і їх вартості в цілому. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми, по відношенню до технологічних теплообмінників, є зниження капітальних витрат і експлуатаційних витрат, які включають в себе очищення поверхні теплообміну ТС з метою видалення забруднень, що створюють додатковий термічний опір, що, в свою чергу, призводить до недогріву теплоносіїв, підвищення витрат і температур теплоносіїв, що нагріваються.

Огляд і аналіз ряду робіт [1-8, 10-14, 18-22] показує, що до основних наслідків відкладення можна віднести:

1. Зміна коефіцієнта теплопередачі K .
2. Зміна площі проходу потоку теплоносія.
3. Зміна геометричної форми каналів через нерівномірність відкладень по довжині і периметру.
4. Зміна шорсткості поверхні.
5. Зміна гідрравлічного опору (як наслідок п. 2, 3, 4).

Слід зазначити, що в загальному випадку товщина бруду ($\delta_{згр}$) і теплопровідності ($\lambda_{згр}$) змінюються з плином часу. У більшості робіт [1-10, 18] наводяться дані про термічний опір теплопередачі різних відкладень без вказівки, скільки часу знадобилося для експлуатації ТА для отримання цих значень, хоча саме час досягнення максимально допустимого значення термічного опору домішок визначає періодичність проведення технічного обслуговування.

Таким чином, загалом припускаючи, що $\lambda_{загр} = const$ можна записати:

$$\Re_{загр} = f(\bar{\tau}) = \frac{\delta_{загр}(\bar{\tau})}{\lambda} \quad (1)$$

З огляду на це, коефіцієнт теплопередачі k також є функцією часу:

$$k(\bar{\tau}) = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \left(\frac{\delta_{загр}(\bar{\tau})}{\lambda_{загр}} \right)_1 + \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{1}{\lambda_2} + \left(\frac{\delta_{загр}(\bar{\tau})}{\lambda_{загр}} \right)_2} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{1}{\lambda_2} + \Re_{загр}^{\Sigma}(\bar{\tau})}. \quad (2)$$

Де індекси 1 і 2 відносяться до опалювального і нагрівального теплоносія. Відповідно, $\Re_{загр}^{\Sigma}(\bar{\tau})$ – сумарний термічний опір забруднень по обидва боки поверхні теплообміну.

Строго кажучи, у виразі (2) постійним залишиться тільки термічний опір градуса $\left(\frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} \right)$, так як коефіцієнти теплопередачі α_1 , α_2 також будуть змінюватися за рахунок впливу відкладень, зазначених в пунктах 2, 3 і 4. Однак наявні джерела [1-8] та відгуки [18, 22] не дають даних про величину зміни коефіцієнта теплопередачі в результаті зменшення площі проходження повітряного потоку, зміни його форми і шорсткості стінки.

Можна припустити, що при відсутності обмежень по потужності, що витрачається на перекачування теплоносія, збільшення витрати може привести до збільшення α , що за величиною може бути компенсовано зниженням k за рахунок термічного опору відкладень.

Слід зазначити, що збільшення частоти обертання теплоносія обмежується вібрацією, шумом і потужністю, що витрачається на перекачування теплоносія [1, 12, 14, 18]. Якщо припустити, що витрата теплоносія залишається незмінним ($G = const$) і за умови, що перетин потоку (S) зменшується під час роботи, то витрата повинна збільшуватися. Подальше збільшення оборотів пов'язане з додатковою ємністю для перекачування теплоносія, що не завжди виправдано.

Таким чином, в робочому ТА

$$G = S(\bar{\tau}) \cdot W(\bar{\tau}). \quad (3)$$

Узагальнений процес зміни геометричної форми гофрованого каналу можна представити наступним чином (рис. 1). Чиста поверхня (рис. 1а) характеризується висотою гофри H і кроком між ними $2T$. В процесі експлуатації западини більш схильні до утворення відкладень, що обумовлено структурою потоку по гофрованій поверхні [1-4, 18]. Вершини виступів залишаються менш забрудненими протягом тривалого часу. Нарешті, заповнення порожнин стає настільки значним, що між гофрами утворюється досить протяжна площадка довжиною L (рис. 1, б) Таким чином, поверхня, за своїм профілем, з профнастилу перетворюється на плоский канал з виступами. Така нова поверхня характеризується іншими геометричними параметрами: L - відстань між виступами; H' і $2T'$ - висота і довжина виступів, відповідно. Аналіз наявних даних теплопередачі для таких поверхонь, наприклад, в роботі [3] вказано, що при $Re = (3/10) \cdot 10^4$ теплопередача гофрованої поверхні пропорційна $Re^{0.5}$, а теплопередача поверхні з виступами пропорційна $Re^{0.8}$ [2, 18]. Більш того, значення місцевого коефіцієнта теплопередачі стають значно нерівномірними по поверхні і, як наслідок, збільшуються теплові перетоків в гофрованій стінці. Крім того, шорсткість ділянок з відкладеннями відрізняється від шорсткості незабрудненою поверхні.

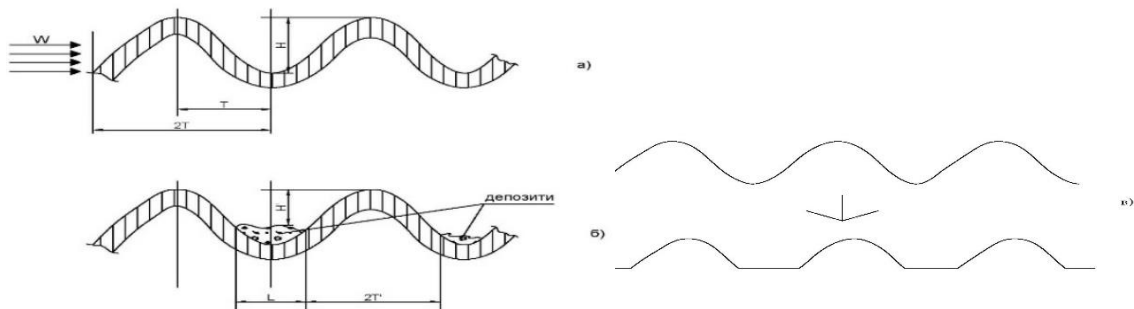


Рисунок 1 – а) – чиста рифлена поверхня; б) однакова поверхня з відкладеннями; в) схема перетворення геометричної форми поверхні в результаті утворення відкладень.

Шорсткість визначає коефіцієнт опору. Якщо вона змінюється в процесі роботи ТА, то в кінцевому підсумку змінюється і необхідна потужність для перекачування теплоносія, що призводить до відхилення значення фактичної швидкості теплоносія в ТА від розрахункової.

Таким чином, відхилення призводять до ряду наслідків, які в сукупності змінюють теплогідрравлічні характеристики діючої ТА. Ряд факторів, а також зміна шорсткості, геометричної форми виступів, вплив зміни швидкості є ще недостатньо вивчені в процесах експлуатації. В основному вплив забруднення враховується у вигляді додаткового термічного опору, величина якого постійна і підбирається на підставі нормативних рекомендацій, які носять фрагментарний характер, вибіркові, часто у вигляді прогнозу [14, 18], а в ряді випадків носять суперечливий характер.

Основні фактори, що впливають на утворення відкладень і методи боротьби із забрудненням поверхні теплообміну

На даний час досить велика кількість різноманітних типів рекуперативних трубок з різними теплоносіями використовується в промисловості [1-3, 18], енергетиці [7-11, 18] і транспорті [18]. Тому доцільно розробити класифікацію ТА, яка відображає конкретні умови утворення забруднень (рис. 2).

Проблема відкладень на поверхнях теплообміну рекуперативних теплообмінників не нова. Поряд з періодичним очищенням різні дослідники пропонували збільшувати швидкість теплоносія [1-5], збільшувати розрахункову поверхню [1-6, 18], вводити в теплоносій присадки [12, 18, 22], різко змінювати температурний режим [7, 18]. Однак до теперішнього часу ще не розроблено універсальної профілактики утворення осаду. Судячи з усього, вона не може бути розвинена в силу ряду об'єктивних причин, до яких слід віднести:

- Неможливість використання «чистого» теплоносія, тобто такого, який не містить домішок, що утворюють відкладення;
- Зміну температури поверхні ТА, а саме її нагрівання, що підвищує хімічну активність конструкційних матеріалів;
- Мікро- і макроелектромагнітні процеси в граничному шарі теплоносія і тонкому поверхневому шарі поверхні теплообміну.

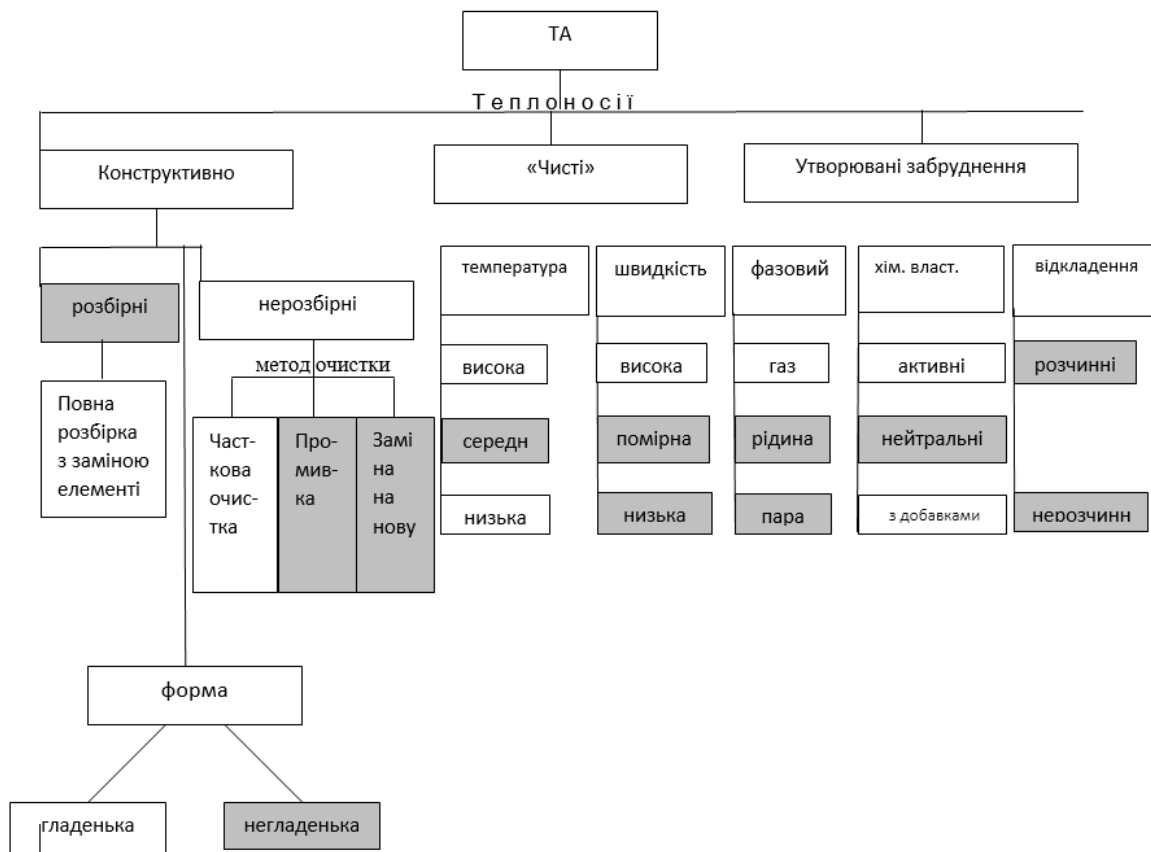


Рисунок 2 – Класифікація ТА за специфічними умовами утворення відкладень (тонировані ознаки, характерні для пластинчастих теплообмінників)

Таким чином, перераховані методи «запобігання» забруднення, в кращому випадку, є рішеннями конкретних проблем для конкретних умов. Окрім того, збільшення частоти обертання теплоносія призводить до збільшення гідравлічного опору, а значить і ємності для перекачування теплоносія.

Збільшення поверхні для компенсації зростаючого термічного опору також не може вважатися повністю виправданим, оскільки, по-перше, забруднюється і додаткова поверхня; по-друге, зростає вартість ТА, і, нарешті, по-третє, збільшується гідравлічний опір.

Застосування присадок також не є універсальним методом, так як не всі теплоносії можна вводити, крім того, при підвищених температурах може початися ерозія або корозія поверхневого матеріалу [5, 18, 22], і в цьому випадку не завжди можна однозначно оцінити, що матиме більш негативні наслідки.

Таким чином, слід ще раз підкреслити, що до сих пір основним методом боротьби з відкладеннями на поверхнях ТА є промивання з подальшим очищенням поверхні механічним способом [18, 22].

В останнє десятиліття, з розвитком технологій, одним із шляхів вирішення проблеми відкладень для нерозбірних трубок стала їх повна заміна. Наприклад, для опалювальних агрегатів і систем гарячого водопостачання мідна кожухотруба ТА після вичерпання ресурсу замінюється на нову, а відпрацьована переплавляється і з цього матеріалу виготовляється нова. Для цього потрібна розвинена сервісна мережа і регулярні витрати на покупку нового теплообмінника, за вирахуванням вартості матеріалу, яка постійно змінюється.

Далі проводиться аналіз впливу відкладень на теплогідравлічні характеристики пластинчастих труб (ПТА) - як типу апаратів, які конструктивно (розбірні і напіврозбірні) найбільш придатні для поверхневого обслуговування і набувають в даний час все більшого поширення завдяки ряду переваг [18, 20, 22].

Вимоги до теплоносіїв, будова і властивості шару осаду.

До теплоносіям, що використовуються в енергетичних, транспортних і технологічних системах палива, і систем управління ними пред'являється ряд вимог з точки зору їх теплофізичних, хімічних і експлуатаційних властивостей [7, 18]. Наприклад, теплоносії з високою густиною і теплоємністю дозволяють відводити тепло при відносно невеликих перепадах температур між входом і виходом на ТА при однакових об'ємних витратах теплоносія. У той же час підвищена густина призводить до необхідності витрачати більше енергії на привід насосів при інших рівних умовах. Висока теплопровідність теплоносія позитивно позначається на тепловіддачі, так як знижує термічний опір в граничному шарі.

Важливою характеристикою є температура кипіння теплоносія [6, 7, 18]. Слід прагнути, щоб теплоносій мав відносно високу температуру кипіння при низькому тиску насичуючої пари. Таке співвідношення дає можливість створити ТА, при якому теплоносій залишається в рідкому стані без підвищення тиску. У свою чергу, низький тиск дає можливість знизити вагу конструкції і використовувати звичайні матеріали без ризику руйнування теплообмінника.

З точки зору вибору матеріалу ТА, ще одним важливим фактором є хімічні властивості теплоносія. Необхідно, щоб теплоносій був хімічно стійким, не сприяв корозії і ерозії матеріалу, не утворював вибухонебезпечних сумішей, таких як рідкі лужні метали з водою. Алюміній з водою також дає екзотермічну реакцію при певних температурах. Ці фактори також істотно впливають на властивості і структуру відкладень.

Таким чином, підвищення температури призводить до спікання відкладень в шарі біля стінок. Різні домішки в теплоносії, вступаючи в реакцію один з одним і з матеріалом ТА, можуть збільшувати кількість відкладень і інтенсивність їх утворення. Ерозія збільшує шорсткість поверхні, створюючи сприятливі умови для прилипання осадів, тобто відкладень, до поверхонь.

Слід також зауважити, що властивості теплоносія істотно впливають на інтенсивність відкладень на поверхнях теплообміну. Відкладення утворюються при роботі теплообмінників на різних теплоносіях, з обох боків, як на гладеньких, так і на розвинених поверхнях. Наприклад, на зовнішніх поверхнях теплообмінників транспортних засобів відбувається осадження пилу, масел, продуктів згоряння палива тощо [12]. Теплообмінники – випарники холодильних установок зі сторони повітря характеризуються утворенням інею [18, 19], що також знижує коефіцієнт теплопередачі.

Однак, незважаючи на різноманіття умов експлуатації ТА та охолоджуючих рідин, більшість дослідників аналогічно оцінюють структуру шарів осаду [18, 20, 22]. Вона ділиться на три характерних шарі – верхній, середній і нижній. Верхній шар складається з частинок, які слабо з'єднані між собою. У середньому шарі відбувається процес кристалізації. Нижня в більшості

випадків є кристалічним утворенням. У роботі [6] відзначено, що коли в теплоносії переважає одна сіль, то, як правило, утворюються тверді відкладення, так звана окалина, коли окремі частинки яких міцно пов'язані між собою і поверхнею теплообміну. Якщо в теплоносії міститься велика кількість солей, то при їх осіданні між групами кристалів різних солей можуть утворюватися порожнечі, де осідають зважені частинки, знижуючи міцність відкладень.

Великий обсяг матеріалів щодо властивостей відкладень наведено в роботах [7, 18, 22], проте практичне застосування цих даних представляється досить обмеженим, так як вони наведені для шару товщиною $\delta_3 = 5$ мм, а температура теплоносія не перевищує 200°C .

Основним недоліком даних, що наведені в роботі [7] є відсутність інформації про тривалість роботи ТА, необхідного для формування шару забруднення товщиною $\delta_3 = 5$ мм, або іншого розміру.

У роботах [3, 4, 18] відзначається, що товщина і властивості шару забруднення є функцією зміни параметрів, зокрема, часу, швидкості теплоносія, температури, щільності теплового потоку і концентрації домішок в теплоносії.

Таким чином, сукупність функцій перерахованих параметрів в залежності від тривалості роботи ТА в цілому визначають зміну теплопередачі в процесі роботи теплообмінника.

Пізніші публікації [7] дають цікаву класифікацію видів забруднень, а саме: грубих, крупнодисперсних частинок (carse fouling) і поверхневих відкладень. Причому, вважається, що перші в основному впливають на гідравлічний опір і практично не знижують тепловіддачу.

У свою чергу, поверхневі забруднення поділяються на накип ($\lambda \approx 2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$), біовідкладення ($\lambda \approx 0,57 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$) і осад ($\lambda \approx 1,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$) (або замулення), утворенню яких сприяють грубі крупнодисперсні частинки.

Однак і в цій роботі, як захід боротьби зі зниженням тепловіддачі в результаті відкладень, рекомендується збільшувати поверхню теплообміну, яка для $K \approx 2500 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2\text{К}}$ термічного опору відкладень $\sim 4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}$ може досягати 100 %.

Дані проведених робіт [1, 14, 18] дозволяють зробити висновок, що термічний опір відкладень коливається в межах $(1 \dots 8) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}$ на 1200 годин роботи, в залежності від умов експлуатації, проте не наводилися ні моделі відкладень, ні аналіз експлуатаційних коефіцієнтів.

Одним із способів боротьби з відкладеннями є підготовка охолоджуючої рідини до експлуатації. Вода, будучи однією з найпоширеніших охолоджуючих рідин, містить сольові домішки, які сприяють утворенню відкладень. Однак, незважаючи на попередню обробку води в системах опалення та гарячого водопостачання, як зазначалося в [8, 9], поверхні ПТА забруднюються. Крім того, хімічний склад води в різних регіонах істотно відрізняється, що позначається на продуктивності теплообмінників.

Огляд і аналіз виконаних робіт [3, 6, 7, 8, 9, 17, 18, 20-22] виявив загальну думку, а саме, високу технологічність, надійність і простоту обслуговування ПТА при очищенні теплообмінних поверхонь.

Важливим фактором, що впливає на зміну тепловіддачі в результаті відкладень, є конструкція апарату і геометрична форма поверхні теплообміну [2, 4, 5, 9]. Так, згідно з [2], найбільш схильні до забруднення (в порядку убутання) охолоджуючі сорочки, пластинчасті теплообмінники і трубчасті поверхні, в меншій мірі ребристі канали і спіральні ТА. Більш того, в роботах [4, 5, 18] відзначається, що поверхні з низькими ребрами здатні до «самоочищення» за рахунок розшарування відкладень в результаті різниці температур в ребрі і несучій поверхні. У наявних джерелах відсутні дані про порівняльну забрудненість плит S-подібними і трикутними гофрами, а також про вплив співвідношення розмірів плити і гофри.

Відкладення на поверхнях теплообміну пластинчастих теплообмінників

Проблема відкладень для пластинчастих теплообмінників вирішується простіше, ніж для більшості інших пристроїв [1, 18, 22]. Високий ступінь турбулентності потоку між плитами при відносно низьких числах Рейнольдса зводить до мінімуму утворення більшості типів відкладень. Конструкція пристрою дозволяє очищати поверхню безпосередньо на місці. Якщо необхідне ручне очищення, то такий тип теплообмінника можна легко розібрати, почистити і знову зібрати. Дані, опубліковані Асоціацією

виробників трубчастих теплообмінників [3], дозволяють зробити висновок, що термічний опір відкладень вдвічі менший, ніж у трубчастих пристроїв.

Використовувати дані про відкладення в трубчастих апаратах представляється недоцільним, так як коефіцієнти теплопередачі в пластинчастих апаратах значно вище. Однак при відсутності даних рекомендується [7, 18, 22] при проєктуванні пластинчастих теплообмінників використовувати значення термічного опору, що не перевищують $1/5$ значень для трубчастих апаратів.

За аналогією з процесами кристалізації товщину шару і масу забруднень можна визначити наступним чином:

$$\rho_3 F \frac{d\delta_3}{d\tau} = \frac{dm}{d\tau}. \quad (4)$$

Зміна маси забруднюючого компонента

$$\frac{dm}{d\tau} = \beta F (\Delta c)^4 \quad (5)$$

Припускаючи лінійну зміну концентрації забруднюючих речовин для діапазону температур рідини (t_p) і забруднюючих речовин (t_3), то зміна концентрації

$$\Delta c = c(t_3 - t_{жс}). \quad (6)$$

Беручи до уваги (5) і (6), переписати (4) щодо швидкості утворення забруднень ($\frac{d\delta_3}{d\tau}$)

$$\frac{d\delta_3}{d\tau} = \frac{p}{\rho_3} \beta^4 (t_3 - t_p)^4. \quad (7)$$

Як видно з рівняння (7), швидкість зростання товщини забруднюючих речовин пропорційна температурному напору ($t_3 - t_p$) і коефіцієнту масопередачі. З цього виразу також випливає, що чим менша щільність відкладень, тим нижча швидкість зростання їх товщини.

У виразі (7), строго кажучи, β також є функцією швидкості середовища і температури, що ускладнює його використання на практиці.

Швидкість утворення шару забруднення за даними [12, 18] можна представити як різницю між факторами осадження ($\overline{\Phi_m}$) і перенесення ($\overline{\Phi_n}$):

$$\frac{d\delta_3}{d\tau} = \Phi_m - \overline{\Phi_n}. \quad (8)$$

З цієї ж причини (1.8) також є скоріше теоретичним, оскільки експериментальні дані про $\overline{\Phi_m}$ і $\overline{\Phi_n}$ недостатні.

Експериментальні дані [6, 18] показують, що шар осаду, що утворився при малих швидкостях течії, може бути розмитий і видалений шляхом короткочасного збільшення швидкості. Аналогічний підхід, тільки за рахунок підвищення температури, згадується в [14, 18]. Таким чином, виникають впливи, які пригнічують, тобто сповільнюють, ріст шару забруднення.

З огляду на труднощі, що виникають при теоретичних дослідженнях, експериментальні дані апроксимуються простим асимптотичним співвідношенням [5]:

$$\frac{R_3}{R_3^*} = 1 - e^{-B\bar{z}} \quad (9)$$

Таке наближення здається цілком прийнятним для практичних розрахунків, але й рівняння (9) не позбавлене недоліків. По-перше, низька точність на початковому етапі процесу утворення забруднень. По-друге, існують труднощі і умовність у визначенні максимально допустимого термічного опору забруднень.

У переважній більшості робіт товщина шару забруднення аналізується на основі рівняння теплопередачі [15, 16, 22]

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_0} + R_3, \quad (10)$$

де k і k_0 – коефіцієнт теплопередачі для брудної і чистої теплообмінних поверхонь.

В цілому аналіз робіт за останні сорок років [1-14, 18-22] показує, що теплоносії з відносно різною густиною і теплопровідністю компонентів мають більш високу швидкість відкладення; відносно високий температурний напір призводить до відносно швидкого зниження коефіцієнта теплопередачі; збільшення швидкості потоку призводить до збільшення тепловіддачі і деякого

зниження швидкості утворення відкладень, при цьому спостерігається значне збільшення гідравлічного опору.

Висновки

1. Розрахунок і підбір теплообмінника проводиться для чистої поверхні, величина якої збільшується в порівнянні з проєктними значеннями на 10-15, а іноді і до 50%, щоб компенсувати зниження коефіцієнта теплопередачі в результаті відкладень.

2. Зниження теплового навантаження теплообмінника після певного періоду експлуатації обумовлено тим, що частина температурного напору витрачається на подолання термічного опору поверхневих забруднень.

3. Різниця температур в шарі осаду пропорційна термічному опору шару, що не несе ніякої інформації про час роботи ТА, так як різниця температур в рівній мірі залежить від теплового потоку ($\Delta t_3 = qR_3$). Теплові потоки в процесі експлуатації можуть приймати різні значення. Тому, маючи одне розрахункове значення теплового потоку, використання опору забрудненого шару практично не має особливого сенсу.

4. Збільшення витрати рідини, як спосіб боротьби з відкладеннями, призводить до збільшення втрат тиску, а підвищення температури не завжди дозволяє досягти ефекту очищення. При цьому тверді забруднення не чутливі до теплового розширення. При цьому зменшується живий переріз, збільшується частота обертання і разом зі збільшенням гідравлічного опору до певного значення збільшується тепловіддача. Тут виникають проблеми з визначенням тривалості роботи ТА, коли збільшення теплопередачі компенсує вплив відкладень, і з визначенням допустимого значення гідравлічного опору. Таким чином, при зменшенні живого перерізу в 1,7 рази втрати тиску збільшуються в 2,5 – 3 рази.

5. Пластинчасті теплообмінники конструктивно найбільш придатні для поверхневого очищення і, завдяки турбулізації потоку при відносно низьких числах Re, мають переваги в стабільності відкладень в порівнянні з широко поширеними трубчастими системами ТА. Однак до сих пір немає залежностей щодо визначення товщини шару осаду, навіть для води, від витрати і тривалості роботи ТА.

6. Для окремих теплоносіїв здатність утворювати відкладення настільки значна, що може «звести нанівець» переваги найбільш ефективних поверхонь.

У зв'язку з цим метою роботи є підтримання величини теплопередачі робочого пластинчастого теплообмінника поблизу проєктного значення на основі розробки заходів щодо зниження впливу термічного опору шару осаду.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити залежність товщини шару бруду від часу роботи і швидкості руху теплоносія;
- розробити модель динаміки характеристик ПТА з урахуванням зміни коефіцієнта теплопередачі в процесі експлуатації для прогнозування періодичності проведення поверхневих робіт;
- провести обстеження діючих ПТА та визначити інтенсивність утворення забруднень для різних теплоносіїв та їх вплив на теплогідравлічні характеристики ПТА;

За результатами виконання вищевказаних завдань передбачається розробити модель функціональної надійності ПТА з урахуванням формування забруднення для розробки схем підключення та графіків експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Novak L. Fouling of compact heat exchangers. Alfa-laval, 2004. 64 p. URL: <https://www.alfalaval.com>
2. Müller-Steinhagen H., Malayeri M.R., Watkinson A.P. Fouling of Heat Exchangers – New Approaches to Solve an Old Problem // Heat Transfer Engineering. 2005. Vol. 26, №1. P. 1–4.
3. Reitzer B. Rate of Scale Formation in Tubular Heat Exchangers // Ind. Eng. Chem. Proc. Des. And Dev. 1964. Vol. 3, №4. P. 63–71.
4. Warlin L. Heat Exchanger Service Guide. Sweden: Alfa Laval Thermal, 2004. P. 7–17.
5. Kern D., Seaton R. A Theoretical Analysis of Thermal Surface // Brit. Chem. Eng. 1959. Vol. 4, №5. P. 258–262.
6. Wilson D.I. Challenges in Cleaning: Recent Developments and Future Prospects // Heat Transfer Engineering. 2005. Vol. 26, №1. P. 51–59.
7. Bohnet M., Bott T.R., Karabelas A.J. Fouling Mechanism. Theoretical and Practical Aspects // Euroterm Seminar №23. Grenoble, France, 1992. P. 51–59.
8. Somerscales E.F.C., Knudsen J.G. Fouling of Heat Transfer Equipment. New York: McGraw–Hill, [b.r.], 743 p.
9. Fouling in Heat Exchange Equipment : Proceedings of the 20th ASME/AICHE. Wisconsin, 1981. HTD. Vol. 17. P. 649–667.
10. Fouling of Heat Exchanger Surfaces / ed. by R.W. Bryers. Pennsylvania, USA, 1982. 826 p.

11. Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation / ed. by T.R. Bott. Birmingham, U.K. : University of Birmingham, 1997. 43 p.
12. Shan R.K., Sehulič D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. New York : Wiley, 2004. 876 p.
13. Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Associations. 4th ed. 1979. 332 p.
14. Cooper A., Sutor J.W., Usher J.D. Cooling Water Fouling in Plate Heat Exchangers // 6th Int. Heat Transfer Conference. Toronto, 1978. P. 33–42.
15. Кулінченко В. Р., Ткаченко С. Й. Теплопередача з елементами масообміну (теорія і практика процесу) [Електронний ресурс]. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/kulinchenko_teploper/
16. Погорелов А. І. Тепломасообмін. Львів : Новий Світ, 2006. 144 с.
17. Шибєцький В. Ю., Дорошук М. М. Теплообмінник пластинчастий : пат. на корисну модель № 128777. 2018. Бюл. № 19. Заявл. 27.03.2018.
18. Аніпко О. Б., Новіков А. І., Савченко В. А. Основні фактори, які впливають на утворення відкладень і способи боротьби із забрудненнями теплообмінної поверхні пластинчастого теплообмінного апарата // Інтегровані технології та енергозбереження. 2010. № 1. С. 14–24.
19. Малезжик І. Ф. Процеси і апарати харчових виробництв. Київ : НУХТ, 2003. 400 с.
20. Мікульонюк І. О. Інноваційне теплообмінне обладнання : монографія. Київ : НТТУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, 2023. 140 с.
21. Горобець В. Г., Богдан Ю. О., Троханяк В. І. Теплообмінне обладнання для когенераційних установок : монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2017. 198 с.
22. Сенчук М. П., Рибка А. М., Юрко О. І. Зниження впливу забруднення поверхонь нагріву твердопаливних теплогенераторів невеликої потужності // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2020. Вип. 33. С. 15–22.

REFERENCES

1. Novak L. Fouling of compact heat exchangers. Alfa-laval, 2004. 64 p. URL: <https://www.alfalaval.com>
2. Müller-Steinhagen H., Malayeri M.R., Watkinson A.P. Fouling of Heat Exchangers – New Approaches to Solve an Old Problem // Heat Transfer Engineering. 2005. Vol. 26, №1. P. 1–4.
3. Reitzer B. Rate of Scale Formation in Tubular Heat Exchangers // Ind. Eng. Chem. Proc. Des. And Dev. 1964. Vol. 3, №4. P. 63–71.
4. Warlin L. Heat Exchanger Service Guide. Sweden : Alfa Laval Thermal, 2004. P. 7–17.
5. Kern D., Seaton R. A Theoretical Analysis of Thermal Surface // Brit. Chem. Eng. 1959. Vol. 4, №5. P. 258–262.
6. Wilson D.I. Challenges in Cleaning: Recent Developments and Future Prospects // Heat Transfer Engineering. 2005. Vol. 26, №1. P. 51–59.
7. Bohnet M., Bott T.R., Karabelas A.J. Fouling Mechanism. Theoretical and Practical Aspects // Euroterm Seminar №23. Grenoble, France, 1992. P. 51–59.
8. Somerscales E.F.C., Knudsen J.G. Fouling of Heat Transfer Equipment. New York : McGraw–Hill, [b.r.]. 743 p.
9. Fouling in Heat Exchange Equipment : Proceedings of the 20th ASME/AICHE. Wisconsin, 1981. HTD. Vol. 17. P. 649–667.
10. Fouling of Heat Exchanger Surfaces / ed. by R.W. Bryers. Pennsylvania, USA, 1982. 826 p.
11. Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation / ed. by T.R. Bott. Birmingham, U.K. : University of Birmingham, 1997. 43 p.
12. Shan R.K., Sehulič D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. New York : Wiley, 2004. 876 p.
13. Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Associations. 4th ed. 1979. 332 p.
14. Cooper A., Sutor J.W., Usher J.D. Cooling Water Fouling in Plate Heat Exchangers // 6th Int. Heat Transfer Conference. Toronto, 1978. P. 33–42.
15. Kulinchenko V. R., Tkachenko S. Y. Teploperedacha z elementamy masoobminu (teoriia i praktyka protsesu) [Elektronnyi resurs]. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/kulinchenko_teploper/
16. Pohorielov A. I. Teplomasoobmin. Lviv : Novyi Svit, 2006. 144 s.
17. Shybetskyi V. Yu., Doroshchuk M. M. Teploobminnyk plastynchastyi : patent na korysnu model № 128777. 2018. Biul. № 19. Zaiavl. 27.03.2018.
18. Anipko O. B., Novikov A. I., Savchenko V. A. Osnovni faktory, yaki vplyvaiut na utvorennia vidkladen i sposoby borotby iz zabrudnenniamy teploobminnoi poverkhni plastynchastoho teploobminnogo aparata // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberzhennia. 2010. № 1. S. 14–24.
19. Malezhyk I. F. Protsezy i aparaty kharchovykh vyrobnytstv. Kyiv : NUHT, 2003. 400 s.
20. Mikulionok I. O. Innovatsiine teploobminne obladnannia : monohrafiia. Kyiv : NTTU «KPI» im. Ihoria Sikorskoho, 2023. 140 s.
21. Horobets V. H., Bohdan Yu. O., Trokhaniak V. I. Teploobminne obladnannia dlia kohoeneratsiinykh ustanovok : monohrafiia. Kyiv : TsP «Komprint», 2017. 198 s.
22. Senchuk M. P., Rybka A. M., Yurko O. I. Znyzhennia vplyvu zabrudnennia poverkhon nahrivu tverdopalyvnykh teplohenaratoriv nevelykoi potuzhnosti // Ventyliatsiia, osvittleniia ta teplohaizopostachannia. 2020. Vyp. 33. S. 15–22.

Аніпко Олег Борисович – доктор технічних наук, професор, професор Харківського національного університету Повітряних Сил України,

Коц Іван Васильович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри інженерних систем Вінницького національного технічного університету,

Снісарчук Дмитро Михайлович – аспірант кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

O.B. Anipko¹
I.V. Kots²
D.M. Snisarchuk²

ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DEPOSITS ON HEAT EXCHANGE SURFACES ON HEAT EXCHANGE EFFICIENCY

¹Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub

²Vinnitsia National Technical University

Energy conservation is one of the priority directions of Ukraine's state policy in the energy sector. This course encompasses not only the implementation of innovative energy-efficient technologies but also the profound modernization of existing production capacities by replacing outdated technological schemes and equipment with the latest, highly efficient solutions. Particular attention is paid to the use of new generation plate heat exchangers (PHEs), which are distinguished by high thermotechnical, technological, and operational characteristics.

The high efficiency of these heat exchangers contributes to the optimization of energy consumption and the increase in the overall economic profitability of enterprises. The calculations of their thermal and hydraulic performance are based on the fundamental principles of hydrodynamics and heat transfer and are well-developed. This allows engineers to accurately select heat exchange surfaces according to the specified flow rates and temperatures of the heat transfer fluid. At the same time, operational experience shows that the theoretically calculated heat transfer area may require an increase of 20–200% due to the need to account for additional thermal resistance caused by the formation of fouling layers.

However, to date, the data on the thermal resistance of deposits are mainly of a recommendatory and fragmented nature, which complicates their practical application. They often do not take into account the specifics of heat exchanger designs and their operating conditions, and sometimes even contradict each other. This applies to both industrial heat transfer fluids and water – the most common one. Fouling of heat exchange surfaces significantly reduces the efficiency of PHEs in various industries, including transport, energy, technological processes, and the municipal sector. The formation of deposits on the heat exchange surface leads to an increase in electricity costs for pumping the heat transfer fluid, changes in the temperature regime, and, as a result, an increase in both capital and operating expenses. In critical cases, this can lead to the failure of the heat exchanger due to channel blockage.

Given the above, scientific research aimed at ensuring the long-term preservation of the design heat transfer characteristics is becoming particularly relevant. Their goal is to develop sound theoretical foundations and practical recommendations that will minimize the negative impact of fouling on the operation of heat exchangers, thereby contributing to increasing their reliability and efficiency.

Keywords: heat transfer; deposits; thermal efficiency; analytical review; deposit formation models; surface cleaning methods; innovative protection technologies; system productivity.

Anipko Oleh B. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Kharkiv National Air Force University of Ukraine.

Kots Ivan V. – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Engineering Systems, Vinnitsia National Technical University.

Snisarchuk Dmytro M. – Postgraduate student of the Department of Thermal Power Engineering, Vinnitsia National Technical University.