

Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор, М. В. Ільченко, канд. техн. наук, доцент,  
К. В. Перемот, студентка, Е. Р. Нагорний, аспірант, І. В. Пільник, аспірант,  
В. Г. Рись, аспірант

## ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ОХОЛОДЖЕНІ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків*

**Ключові слова:** термозміцнений прокат, охолодження водою, екологоенергетична ефективність, плівкове охолодження газові турбіни, диспергована вода, диспергований розчинник, поверхнево-активні речовини (ПАР), поверхневі явища, контактуючі фази, поверхнева енергія, адсорбція, десорбція, гетерогенна система, вільна поверхнева енергія.

### Постановка задачі

У металургії при виробництві термозміцненого прокату широкого поширення набули системи, в яких необхідний тепловий стан виробів забезпечується за рахунок охолодження високотемпературних поверхонь розпиленою водою. Світовий досвід по застосуванню засобів підвищення екологоенергетичної ефективності в газотурбобудуванні на прикладі плівкового охолодження лопаток високотемпературних газових турбін та теплоенергетиці на прикладі охолодження високотемпературних поверхонь стінок ванни скловарної печі також ґрунтується на охолодженні поверхонь розпиленою водою.

Очевидно, що в цих випадках забезпечення заданих механічних характеристик прокату, зниження енерговитрат та витрати охолоджувача, вибір режимно-геометричних характеристик системи термозміцнення визначається достовірністю відомостей про щільність теплового потоку в процесі нестационарного теплообміну диспергової води з поверхнею охолодження [1].

Основним охолоджувачем вище названих процесів є вода. В науковій літературі багато публікацій про охолодження високотемпературної поверхні дисперговою водою. Але ніяких наукових досліджень охолодження високотемпературної поверхні диспергованим розчинником, в склад якого входить вода з різною концентрацією поверхнево-активних речовин (ПАР) в науковій літературі ми не знайшли.

Тому, актуальність подальших досліджень теплообміну високотемпературної поверхні диспергованим розчинником, в склад якого входить вода з різною концентрацією (ПАР) стосовно теплових процесів в енергетичному обладнанні та металургійному виробництві визначила зміст цієї статті [2].

Краплі води на високотемпературній поверхні мають круглу форму тому, що у воді самий великий поверхневий натяг на межі вода – поверхня. Всі поверхневі явища пов'язані з особливостями поверхні поділу фаз і виникають на межі розподілу між двома або більшою кількістю двох контактуючих фаз [3]. Вони обумовлені поверхневою енергією і властивостями дисперсних систем. Ці явища відповідальні за протікання безлічі природних та технологічних процесів – змочування, адсорбції, десорбції, жив-

лення рослин, нанесення покриттів, просочування, уловлювання цінних або шкідливих компонентів [4].

Будь-яка гетерогенна система на межі розподілу фаз має певний запас вільної поверхневої енергії. Властивості молекул на поверхні розподілу рідина-газ (повітря) відрізняються від властивостей молекул в об'ємі рідкої фази [5].

Молекули всередині рідини рівномірно притягуються з усіх боків такими самими за природою молекулами, і силове поле міжмолекулярної взаємодії скомпенсоване (рівнодійна сил дорівнює нулю).

Якщо молекула рідини знаходиться на поверхні поділу фаз, сили міжмолекулярної взаємодії не врівноважуються, оскільки інтенсивність взаємодії між молекулами рідини значно вища, ніж між молекулами рідини та газу; рівнодійна сил  $F$  не дорівнює нулю і направлена всередину рідкої фази. Це зумовлює втягування поверхневих молекул углиб рідини. Таким чином, молекули, розташовані на поверхні, мають певний надлишок енергії, який називають вільною поверхневою енергією  $G_s$ . Відношення надлишку вільної поверхневої енергії Гіббса до площі поверхні поділу фаз називають поверхневим натягом [6]:

$$\sigma = \frac{G_s}{S}, \quad (1)$$

де  $G_s$  – вільна поверхнева енергія;  $S$  – площа поверхні поділу фаз;  $\sigma$  – поверхневий натяг. Його можна визначити як роботу при оборотному ізотермічному процесі, яку потрібно виконати для збільшення поверхні поділу фаз на  $1 \text{ м}^2$ . Виражають в одиницях сили на одиницю довжини (Н/м) або величиною енергії на одиницю площі (Дж/м<sup>2</sup>) [7].

Величину поверхневого натягу визначають експериментально кількома методами: капілярного підняття, максимального тиску бульбашок повітря (метод Ребіндера), сталагмометричним, відриву кільця, втягування пластинки (метод Вільгельмі) та ін.

Поверхневий натяг – характерна фізична константа будь-якої чистої рідини за сталої температури. Він тим більший, чим більші полярність молекул рідини і здатність їх утворювати водневі зв'язки. Порівняно з іншими рідинами, поверхневий натяг води є найбільшим.

**Мета статті.** Визначити теоретично та експериментально ознаки як поверхневий натяг диспергованого розчинника, в склад якого входить вода з різною концентрацією (ПАР) впливає на теплообмін при охолодженні високотемпературної поверхні стосовно теплових процесів в енергетичному обладнанні та металургійному виробництві.

Останнім часом широко впроваджується система випарного охолодження металургійних печей (доменних, мартенівських, електроплавильних, нагрівальних і вагранок). При випарному охолодженні тепло від нагрітих елементів печі відводиться водою, нагрівається до утворення пароводяної емульсії. При цьому використовується прихована теплота пароутворення, тобто тепло, що вбирається охолоджуючою водою, витрачається на її випаровування [8]. У холодильники печі подається вода, звільнена від солей жорсткості і позбавлена корозійних властивостей. Одержуваний пар використовується на технологічні потреби заводу.

При випарному охолодженні 1 кг води, випаровуючись, відбирає у охолоджуваної деталі 539 ккал. Крім того, вода, що надходить до системи, нагріваючись до кипіння, відбирає ще 70 ккал. Щоб відібрати таку ж кількість тепла при водяному охоло-

дженні при підвищенні температури води на 10 °С було б потрібно ( 539 +70 ) / 10 ~ 60 кг води, тобто в 60 разів більше, ніж при випарному охолодженні.

Випарне охолодження має такі переваги: 1) вода необхідна на охолодження деталей лише нижньої будови металургійних печей, т. е. потрібно приблизно 30 % її загальної витрати при водяному охолодженні, 2) забезпечується надійність роботи печі і скорочуються її простої для ремонту охолоджуваних деталей; 3) використовується тепло охолоджуючого середовища у вигляді пару, 4) зменшуються в три рази обсяг споруд і потужність системи водопостачання.

Охолодження вузлів устаткування широко застосовується в самих різних областях техніки. За своїм призначенням його можна поділити на два види: охолодження з метою зниження температури в робочому об'ємі обладнання та охолодження з метою забезпечення стійкості конструкції власне охолоджуваного вузла. У ряді випадків ці дві мети фактично збігаються. Так, в компресорі з водяним охолодженням останнє, з одного боку, знижує показник політропи стиснення, роблячи процес стиснення більш економічним, а, – з іншого, запобігає небезпечному перегріву конструктивного обрамлення робочого простору машини. Навпаки, при охолодженні, наприклад, псевдорідинного шару в печах випалу в киплячому шарі з зануреними в нього холодильниками - теплообмінниками метою є лише зниження температури робочого об'єму (самого шару); якщо ця мета не ставиться, холодильники просто не потрібні.

В даний час переважна більшість металургійного обладнання – металургійних печей – тією чи іншою мірою відноситься до агрегатів, що охолоджуються. У деяких з них – шахтних, Ванюкова, ф'юмінгових та деяких інших – охолоджувані вузли є основою конструкції печі. В інших печах ці вузли становлять невелику частину конструкції, однак при цьому можуть відігравати досить значну роль в роботі агрегату, у багато разів збільшуючи його міжремонтну кампанію або роблячи можливим здійснення в печі таких технологічних функцій, які в відсутність охолодження вузла були б практично неможливі.

У вітчизняній металургії виробництва металів використання охолодження в печах особливо поширене в порівнянні із зарубіжною практикою. Це пояснюється тим, що до останнього часу одним з генеральних напрямків розвитку нашого металургійного виробництва було форсування печей, прагнення підвищити їх питому продуктивність. Це давало можливість знизити капітальні витрати при будівництві та реконструкції металургійних об'єктів або підвищити потужність діючих перероблених печей без значних капіталовкладень. Оскільки збільшення питомої продуктивності веде до підвищеного зносу конструкції печі, насамперед її вогнетривкої футеровки, форсований режим роботи стає можливим тільки при захисті конструкції шляхом використання охолодження.

Внаслідок цього вітчизняна металургія має безсумнівний пріоритет в плані використання в різних печах охолоджуваних вузлів різних конструкцій, а також щодо застосування в них різних систем охолодження.

На закордонних підприємствах питома потужність пічних агрегатів при інших рівних умовах зазвичай істотно (іноді в 2–3 рази) менша, ніж на вітчизняних. Відповідно, відпадає потреба і в охолодженні багатьох вузлів і корпусу печей в цілому. Тим не менше, і в даному випадку повністю відмовитися від охолодження найчастіше не представляється можливим. Однак використовується охолодження при цьому зазвичай тільки для обмежених за площею вузлів, які працюють у важких умовах навіть при невеликій питомій продуктивності печі.

Робота охолоджуваного вузла або елемента в печі характеризується рядом показників, які визначаються трьома групами величин. Перша група – це характеристика впливу на охолоджуваний елемент з боку робочого простору печі. До цієї групи відносяться температура робочого простору, теплофізичні та фізико-хімічні властивості пічного середовища, яке контактує з елементом, показники гідро-аеродинамічного впливу середовища на елемент і ряд інших. Друга група – це характеристика стінки охолоджуваного елемента, що розділяє пічний простір і середовище, що охолоджує елемент. До цієї групи відносяться конструкція стінки елемента і теплофізичні та фізико-хімічні властивості матеріалу стінки. Нарешті, третя група, – це характеристики середовища, що охолоджує елемент. До них відносяться температура середовища, його теплофізичні та фізико-хімічні властивості, показники гідро-аеродинамічного впливу охолоджуючого середовища на стінку елемента і деякі інші.

Спосіб (система) охолодження безпосередньо визначає інтенсивність процесу відведення тепла до охолоджувача, хоча в тій чи іншій мірі впливає і на характеристики стінки, а через останні – на інтенсивність впливу пічного середовища на елемент. Все ж, оскільки система охолодження найбільшою мірою визначає інтенсивність охолодження, саме з точки зору останньої зазвичай в першу чергу характеризують різні системи. В даний час для охолодження вузлів металургійних печей переважно використовують три системи: повітряну, холодною водою під позитивним надлишковим тиском (її називають просто водним охолодженням) та випарна. Повітряне охолодження з огляду на, перш за все, особливі теплофізичні властивості охолоджувача повітря характеризується досить низькою інтенсивністю охолодження, в силу чого може застосовуватися і застосовується тільки для обмеженого кола умов, в яких працюють охолоджувані вузли. Інтенсивність охолодження холодною водою, щонайменше, на два порядки вище, ніж при повітряному охолодженні; ще більше, як правило, інтенсивність при випарній системі охолодження. Ці дві системи охолодження і застосовуються для пічних вузлів, що працюють у важких умовах [9].

Згідно з другим законом термодинаміки, поверхнева енергія рідини прагне досягти мінімуму. У чистих рідинах такий стан забезпечується зменшенням площі поверхні  $S$ . Цим пояснюють кулясту форму крапель води, оскільки поверхня кулі мінімальна. Проте форма крапель у різних рідинах різна. У ртуті при температурі 20 °С, поверхневий натяг дуже великий (485,1 мН/м), краплі мають форму ідеальної кулі. У воді при температурі 20 °С притягання молекул слабше, поверхневий натяг менший (72,75 мН/м) і краплі мають овальну (втягнуту) форму. А спирт, бензин, у яких поверхневий натяг ще менший, розтікаються по поверхні у вигляді плівки [10].

Із формули (1) випливає, що поверхнева енергія системи залежить від поверхневого натягу та площі поверхні поділу фаз. Було зазначено, що запас вільної поверхневої енергії чистої рідини можна змінити, змінюючи її поверхню. Для розчинів цього можна досягти лише зміною поверхневого натягу. Отже, надлишок вільної поверхневої енергії на межі поділу фаз у розчинах компенсується самочинним зменшенням поверхневого натягу, яке відбувається під час адсорбції – самочинному процесі зміни концентрації компонентів у поверхневому шарі  $C_s$  порівняно з їх концентрацією в об'ємі фази  $C_v$ . Загалом залежно від природи розчиненої речовини поверхневий натяг розчину може зменшуватись, збільшуватись або не змінюватись, порівняно з поверхневим натягом розчинника.

Тому саме стосовно води усі речовини поділяють на поверхнево-активні, поверхнево-неактивні (поверхнево-інактивні) та поверхнево-індиферентні. Такий поділ умо-

вний, оскільки значна кількість речовин, які є поверхнево-активними у водних розчинах, – поверхнево-неактивні в інших розчинниках [11].

Поверхнево-активні речовини (ПАР) – це сполуки, що адсорбуються на поверхні поділу фаз ( $C_s > C_v$ ) і зменшують поверхневий натяг води ( $\sigma_{\text{р-ну}} < \sigma_{\text{води}}$ ).

ПАР поділяють на аніонактивні, катіонактивні, неіоногенні та амфолітні (амфотерні).

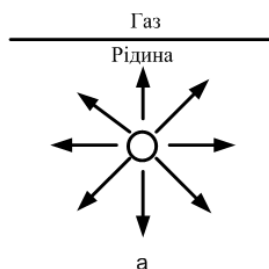


Рисунок 1 – Міжмолекулярні сили, що діють на молекули в об'ємі рідини

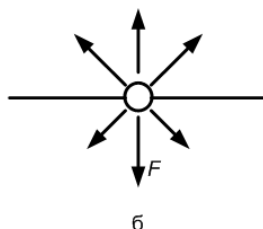


Рисунок 2 – Міжмолекулярні сили, що діють на молекули у поверхневому шарі

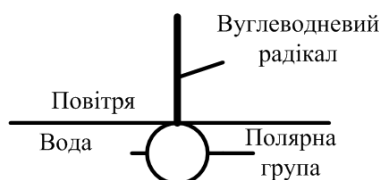


Рисунок 3 – Схема будови і орієнтація молекули ПАР на поверхні води

Така властивість ПАР визначається особливістю їх будови.

У молекулі ПАР розрізняють дві частини: неполярну (вуглеводневий ланцюг) та полярну (функціональна група, наприклад  $-\text{OH}$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$  та ін.). Тому до ПАР належать спирти, жирні кислоти та їх солі (мила), сульфокислоти та інші класи органічних сполук. Вуглеводнева частина молекули гідрофобна (відштовхує воду), а полярна група, яка має значний дипольний момент і інтенсивно взаємодіє з водою, є гідрофільною (тобто притягує воду). Молекули, що мають таку будову, називають дифільними. Найвигіднішим положенням дифільних молекул є їх розміщення на межі поділу фаз, оскільки полярна група втягується водою, а неполярний вуглеводневий радикал виштовхується з неї [12].

У дифільних молекул з короткою гідрофобною частиною (нижчі представники наведених гомологічних рядів) переважають гідрофільні властивості, тому вони легко розчиняються у воді. Зі збільшенням довжини вуглеводневого радикалу посилюються

гідрофобні властивості речовин, знижується їх розчинність у воді і зменшується власний поверхневий натяг.

Поверхнево-неактивними (ПНР) називають речовини, які збільшують поверхневий натяг води ( $\sigma_{p-ny} > \sigma_{води}$ ) і концентруються в об'ємі розчину ( $C_S < C_V$ ). До поверхнево-неактивних речовин належать неорганічні кислоти, основи, солі та деякі дуже полярні органічні сполуки (гліцерол, амінокислоти тощо).

Поверхнево-індиферентними (ПІР) називають речовини, що не змінюють поверхневий натяг розчинника ( $\sigma_{p-ny} = \sigma_{води}$ ) оскільки їх поверхнева й об'ємна концентрації однакові ( $C_S = C_V$ ). Прикладом таких речовин є сахароза та інші вуглеводи, форміатна кислота НСООН (містить полярну групу, але не має вуглеводного радикалу).

Якщо концентрація дифільних молекул ПАР невелика, то всі вони розміщуються на межі поділу так, що вуглеводні радикали знаходяться на поверхні води і орієнтовані щодо неї під кутом, близьким до  $10^\circ$ . Таке розміщення можливе завдяки гнучкості вуглеводного ланцюга [13].

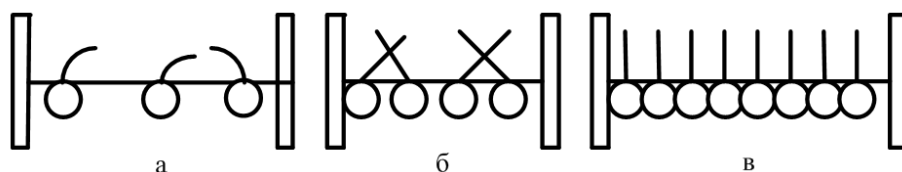


Рисунок 4 – Схема орієнтації молекул ПАР у поверхневому шарі

При збільшенні концентрації молекули ПАР набувають чіткішої орієнтації, за певної їх концентрації розміщуються чітко вертикально, утворюючи насичений мономолекулярний адсорбційний шар. Висновок про те, що в мономолекулярному поверхневому шарі вуглеводні радикали ПАР орієнтовані вертикально, було підтверджено рентгенографічними дослідженнями.

Поверхневу плівку з одного шару молекул ПАР, що утворюється на межі між водним розчином ПАР і повітрям, органічною рідиною або твердою поверхнею, називають **моношаром**.

Графіки залежності  $\sigma = f(C)$  називають **ізотермою поверхневого натягу** і можуть мати вигляд, зображений на рис. 5. Для поверхнево-неактивних речовин зі збільшенням концентрації поверхневий натяг зростає (крива 1), для поверхнево-індиферентних – не змінюється (крива 2), а для поверхнево-активних – зменшується (крива 3).

Аналіз ізотерм поверхневого натягу свідчить, що всі криві починаються з однієї точки, яка відповідає поверхневому натягу води. При добавлянні до води перших порцій ПАР останні майже повністю розподіляються у поверхневому шарі і поверхневий натяг різко зменшується. Момент утворення насиченого мономолекулярного шару ПАР відповідає мінімуму поверхневого натягу [14].

Здатність поверхнево-активних речовин знижувати поверхневий натяг кількісно виражають поверхневою активністю. Її визначають як відношення зміни поверхневого натягу до зміни концентрації ПАР і на честь Гіббса позначають буквою  $G$  :

$$G = \pm \frac{d\sigma}{dC}$$

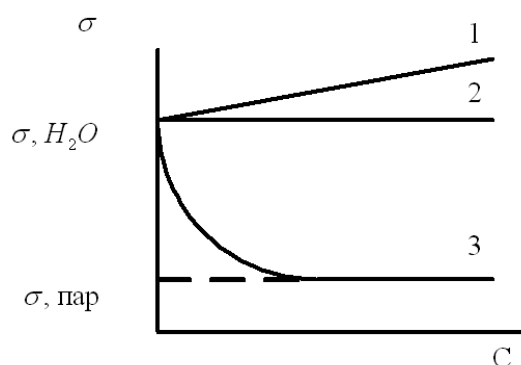


Рисунок 5 – Залежність поверхневого натягу від концентрації речовин у водних розчинах: 1 – поверхнево-неактивних; 2 – поверхнево-індіферентних; 3 – поверхнево-активних

У Міжнародній системі одиниць (СІ) поверхневу активність вимірюють у Дж·м/моль або Н·м<sup>2</sup>/моль. Вона показує зменшення поверхневого натягу розчину при зміні концентрації ПАР на одиницю і характеризує адсорбційну здатність речовини.

Якщо поверхневий натяг зі збільшенням концентрації розчиненої речовини зменшується, то:

$$\frac{d\sigma}{dC} < 0,$$

що спостерігається для ПАР. Для ПНР поверхнева активність є додатною величиною:

$$\frac{d\sigma}{dC} > 0,$$

оскільки зі зростанням концентрації таких речовин поверхневий натяг також збільшується.

Активність дифільних молекул залежить від довжини вуглеводневого радикалу. Біолог П. Дюкло та фізіолог **Ж. Траубе** (1831) сформулювали таке правило: у певному гомологічному ряду (жирних кислот, спиртів та інших дифільних сполук) у водних розчинах однакової концентрації зі збільшенням довжини вуглеводневого радикалу на одну групу —CH<sub>2</sub>— поверхнева активність збільшується у 3–3,5раза, тобто:

$$\frac{G_{n+1}}{G_n} = \beta \approx 3 - 3,5,$$

де  $G$  – поверхнева активність;  $n$  – число груп —CH<sub>2</sub>—;  $\beta$  – коефіцієнт Траубе.

Правило Дюкло-Траубе найточніше виконується за низьких концентрацій розчинених речовин. Із нього випливає важливий висновок: площа, яка припадає на одну молекулу максимально насиченого ПАР адсорбційного шару, залишається сталою в межах гомологічного ряду. Наприклад, для спиртів вона становить 0,25 нм<sup>2</sup>, для кислот – 0,205 нм<sup>2</sup>. Згідно з правилом Дюкло-Траубе змінюється анальгетична та наркотична дія відповідних лікарських препаратів [15].

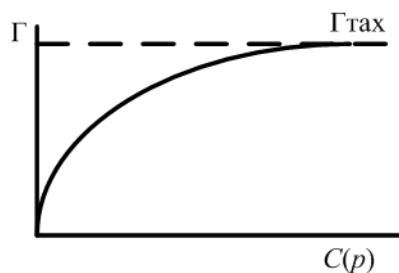


Рисунок 6 – Загальний вигляд ізотерми адсорбції

Мінімальне значення поверхневого натягу на ізотермах відповідає моменту повного насичення поверхневого шару молекулами ПАР, тобто максимальній адсорбції ( $\Gamma_{\text{ТАХ}}$ ). Графік залежності величини адсорбції від концентрації  $\Gamma = f(C)$  називають **ізотермою адсорбції**.

Наведені графіки показують, що зі збільшенням концентрації ПАР адсорбція зростає, причому за малих концентрацій залежність пропорційна, а за високих – адсорбція досягає свого граничного значення  $\Gamma_{\text{ТАХ}}$  і потім не змінюється. Величина  $\Gamma_{\text{ТАХ}}$  є сталою для всіх членів гомологічного ряду, оскільки визначається тільки природою функціональних груп.

На сьогодні ще не розроблено надійних методів визначення надлишку розчиненої речовини у поверхневому шарі, проте можна експериментально точно виміряти поверхневий натяг розчинів ПАР різних концентрацій, а потім обчислити величину адсорбції за **рівнянням Гіббса** (1878):

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dc}, \quad (2)$$

де  $\Gamma$  – величина адсорбції розчиненої речовини, моль/м,  $C$  – загальна концентрація розчину, моль/м<sup>3</sup>;  $R$  – газова стала;  $T$  – абсолютна температура, К;  $\pm \frac{d\sigma}{dc}$  – поверхнева активність  $G$ , Н·м<sup>2</sup>/моль.

Рівняння Гіббса є математичним обґрунтуванням загального правила: речовина, що зменшує поверхневий натяг, концентрується у поверхневому шарі.

Аналіз рівняння Гіббса (1) підтверджує, що оскільки для ПАР  $\frac{d\sigma}{dc} < 0$  то адсорбція є додатною величиною ( $\Gamma > 0$ ); для ПНР  $\frac{d\sigma}{dc} > 0$  і адсорбція є від'ємною ( $\Gamma < 0$ ), тобто поверхнево-неактивні речовини не адсорбуються на межі поділу, а розподіляються в усьому об'ємі розчину.

Поверхневий натяг залежить від температури і для багатьох рідин лінійно зменшується з її підвищенням. Це пояснюють тим, що через прискорений рух молекул послаблюються сили тяжіння молекул і за певної критичної температури (температура кипіння) поверхневий натяг дорівнюватиме нулю – зникне межа поділу, система стане гомогенною, рідина перейде у газуватий стан.

Незважаючи на велику передісторію дослідження кризових режимів кипіння, це питання стосовно термічної взаємодії розпиленої води з високотемпературною поверх-

нею вивчено дуже докладно. За даними дослідників [16–22] в умовах теплообміну при кипінні кількість тепла, що відводиться за рахунок процесу фазового перетворення частини води, виявляється дуже малим порівняно з конвективною складовою теплового потоку. Ця особливість повинна зберігатися при охолодженні високотемпературної поверхні розпиленою водою. Разом з тим, крім турбулізуючого впливу бульбашок парової фази, що утворюються, конвективне тепловідведення від поверхні визначається, мабуть, ступенем прогрівання натікаючої на неї води за час перебування на поверхні. З цього погляду збільшення густини зрошення, за інших рівних умов, має призводити (при початковій температурі поверхні) до зниження середньої температури, до якої прогриваються пристінні шари рідини, тобто. до збільшення температурного напору між поверхнею та охолоджувальною водою. Останнє і визначає інтенсифікацію теплообміну. А збільшення густини зрошення  $g$  пов'язано зі збільшенням товщини плівки води, що екранує (на наш погляд) прикордонний парорідкісний шар від турбулізуючого впливу потоку крапель диспергованого охолоджуючого середовища, що в результаті послаблює процес перенесення тепла. Тому для практичних інженерних розрахунків було запропоновано наступні апроксимаційні залежності для визначення густини теплового потоку:

у докритичній області теплообміну ( $100\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t_{\text{і}} \leq t_{\text{кр}}$ )

$$q = 0,63 \cdot 10^{-6} \cdot g^{0,14} \cdot t_{\text{і}}^{2,83}, \quad (3)$$

у закритичній області ( $t_{\text{кр}} \leq t_{\text{і}} \leq 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

$$q = 7,1 \cdot 10^3 \cdot g^{0,32} \cdot t_{\text{і}}^{-1,58}, \quad (4)$$

в області ( $450 \leq t_{\text{і}} \leq 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

$$q = 0,456 \cdot g^{0,32}, \quad (5)$$

тут  $q$  – густина теплового потоку в МВт/м<sup>2</sup>,  $t_{\text{кр}}$  – критична температура поверхні, що відповідає максимальному значенню  $q$ ;  $t_{\text{і}}$  – температура охолоджуваної поверхні.

Тепловіддача при кипінні рідин відрізняється високою інтенсивністю і часто зустрічається у промисловій технології: випарювання, перегонка рідин, випарники тощо. Для виникнення кипіння необхідно, щоб температура рідини була вищою за температуру насичення та наявність центрів пароутворення (мікроскопічні западини).

Розрізняють кипіння на поверхні нагріву та кипіння в обсязі рідини. Кипіння на поверхні обумовлено підведенням теплоти до рідини від поверхні, що стикається з нею. Кипіння в обсязі рідини обумовлено наявністю внутрішніх джерел теплоти або значного перегріву рідини, що виникає, наприклад, при раптовому зниженні тиску (нижче за рівноважний). Найбільш поширеним видом кипіння є кипіння на поверхні. Розглянемо цей вид кипіння.

Для передачі теплоти від стінки до окропу необхідний перегрів стінки щодо температури насичення  $\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{кш}}$ .

На рис. 7 показано типову залежність коефіцієнта тепловіддачі та питомого теплового навантаження від температурного напору  $\Delta T$ .

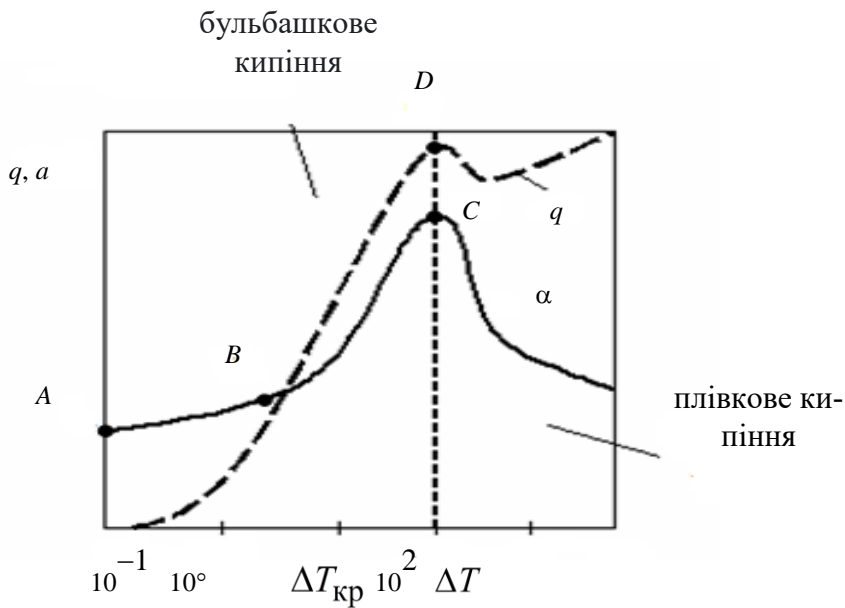


Рисунок 7 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  та питомого теплового навантаження  $q$  при кип'ятінні води від температурного напору  $\Delta T$

В області АВ перегрів малий, мало активних центрів пароутворення, теплообмін визначається законами вільної конвекції біля стінки  $\alpha \sim \Delta T^{1/3}$ . В області ВС перегріву більше, більше центрів пароутворення  $\alpha$  різко зростає. Відбувається турбулізація прикордонного шару біля стіни. Бульбашки, піднімаючись і збільшуючись в обсязі, захоплюють значні маси рідини. На це місце надходить нова порція рідини, таким чином реалізується циркуляція рідини. Тут  $\alpha \sim \Delta T^{1/3}$ .

При  $\Delta T \geq T_{кр}$  відбувається злиття близько утворюваних бульбашок. Якщо  $l < d$  бульбашки, то на поверхні стінки утворюється парова плівка, що створює додатковий термічний опір процесу тепловіддачі. Такий режим кипіння називається плівковим (див. рис. 7).

Для води

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T = 25 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ \alpha_{кр} = 4,5 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}; \\ q_{кр} = 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \end{array} \right.$$

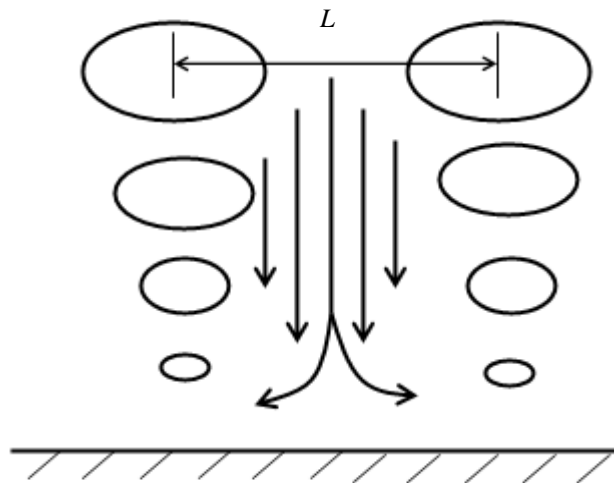


Рисунок 8 – Схема бульбашкового кипіння

Розглянемо рух бульбашки. Досягши певного діаметра  $d_0$ , бульбашка відривається від високотемпературної поверхні.

$$d_0 = 0,02 \cdot \beta \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho - \rho_{\text{п}})}} \quad (6)$$

Тут  $\rho$  та  $\rho_{\text{п}}$  – щільність відповідно води та пари,  $\beta$  – крайовий кут змочування,  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу. У момент відриву бульбашки сила поверхневого натягу води, яка утримує бульбашку, дорівнює Архімедовій підйомній силі. Піднімаючись, бульбашка збільшується в обсязі за рахунок випаровування рідини всередині бульбашки, сплющується і набуває форми гриба. Гриб має складну траєкторію, дробиться на дисперсні каплі.

Таким чином, транспорт теплоти при бульбашковому кипінні складається з перенесення теплоти від стінки до води, а потім теплою води передається внутрішній поверхні бульбашок у вигляді теплоти випаровування. Передача теплоти від стінки безпосередньо бульбашці мізерно мала. Для того, щоб теплота від води передавалася бульбашкам пари, вода повинна мати  $T$  трохи вище температури пари. Тому вода трохи перегріта щодо температури насиченої пари над поверхнею киплячої води. Швидкість перенесення теплоти при кипінні залежить від фізичних властивостей води, тиску,  $\Delta T$ , властивостей матеріалу стінки і т.д.

Врахувати це важко, важко пропонувати єдину залежність. Тому для визначення  $\alpha$  у літературі пропонуються різні фізичні моделі. Але загальноприйнятої моделі немає. Формальний вигляд наступний:

$$\alpha = A \cdot q^n, \quad (7)$$

де  $A$  – складний комплекс багатьох величин, що впливають на інтенсивність перенесення теплоти під час кипіння, а  $0,6 < n < 0,7$ . Іноді пропонують критеріальне рівняння наступного виду:

$$\text{Nu} = A \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Pr}^n, \quad (8)$$

значення  $A$ ,  $m$ ,  $n$  зазвичай визначають експериментально.

### **Висновки**

Було частково визначено теоретично та експериментально ознаки впливу поверхневого натягу диспергованого розчинника, в склад якого входить вода з різною концентрацією поверхнево-активних речовин (ПАР) на процес охолодження високотемпературної поверхні. Далі треба буде провести експериментальні та розрахункові роботи для визначення густини теплового потоку у процесі нестационарного теплообміну диспергованого розчинника з високотемпературною поверхнею виробу.

Застосування диспергованого розчинника, в склад якого входить вода з різною концентрацією поверхнево-активних речовин (ПАР) в якості охолоджувача високотемпературної поверхні у теплоенергетичній установці дозволить: знизити енерговитрати і витрати охолоджувача; зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання; виробляти теплову енергію; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища.

### **Література**

1. Селіхов Ю. А., Рищенко І. М., Горбунов К. О. Інтеграція теплообміну високотемпературної поверхні. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2024. № 3. С. 3–11.
2. Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Пільник І. В. Методика експериментального дослідження локальних умов нестационарного теплообміну. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2024. № 3. С. 12–19.
3. Абрамзон А. А. Поверхностно-активные вещества. Ленинград. 1981. 304 с.
4. Глосарій термінів з хімії. Укладачі Й. Опейда, О. Швайка. Ін-т фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. Донецьк. Вебер. 2008. 738 с.
5. ДСТУ ISO/TR 896:2007. Речовини поверхнево-активні. Наукова класифікація.
6. Айвазов В. В. Практикум по химии поверхностных явлений и адсорбции. Москва. Высшая школа. 1973. 206 с.
7. Ланге К. Р. Поверхностно-активные вещества. Синтез, свойства, анализ, применение. Санкт-Петербург. 2005. 240 с.
8. Айрапетян Т. С. Водне господарство промислових підприємств. Навчальний посібник. Харків. ХНАМГ. 2010. 280 с.
9. Бредихін В. М., Маняк М. О., Смирнов В. О., Пожуєв В. І., Червоний І. Ф., Грицай В. П. Металургія кольорових металів. Підручник. Частина 7. Вторинна металургія кольорових металів. Запоріжжя. ЗДІА. 2009. 452 с.
10. Эйсмондт К. А., Шустов А. В. Получение и применение жидкостно-воздушных закалочных сред. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1980. № 11. С. 43–45.
11. Шинода К., Накагава Т., Тамамуши Б. Коллоидные поверхностно-активные вещества. Москва. 1966. 276 с.
12. Поверхностно-активные вещества. Справочник. Под ред. А. А. Абрамзона, Г. М. Гаевого. Ленинград. 1979. 754 с.

13. Киенская К. И., Сардушкин М. В., Яровая О. В., Авраменко Г. В. Свойства и применение поверхностно-активных веществ. Курс лекций. Москва. РХТУ им. Д. И. Менделеева. 2016. 136 с.
14. Мчедлов-Петросян Н. О., Лебедь А. В., Лебедь В. И. Коллоидные поверхностно-активные вещества. Учебно-методическое пособие. Харків. ХНУ імені В. Н. Каразіна. 2009. 72 с.
15. Белоусов В. П., Морачевский А. Г. Теплоты смешения жидкостей. Москва. *Химия*. 1970. 256 с.
16. Mizikar E. A. Spray cooling investigation for continuous casting of billets and blooms. *Iron and Steel Engineer*. 1970. Vol. 47. No. 6. P. 53–60.
17. Долженков И. Е., Верболоз В. Д. Спрейерное охлаждение фасонных профилей проката при термическом упрочнении. *Металлургия и коксохимия*. 1973. Вып. 36. С. 90–92.
18. Боришанский В. М. Вопросы теплоотдачи двухфазных сред. Москва. ГЭИ. 1961. 392 с.
19. Yuen M. C., Chen L. W. Heat transfer measurements of evaporating liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1978. Vol. 21. No. 5. P. 537–542.
20. Динер А. Обзор литературы по теплопередаче при струйном охлаждении. *Черные металлы*. 1976. № 4. С. 26–29.
21. Heat transfer in two-phase flows. Karman Institute for Fluid Dynamics. Rhode-Saint-Genèse. 1971. P. 452–463.
22. Jang W. J. Vaporization and combustion of binary liquid drops on heated surface. Tokyo Joint Gas Turbine Congress. 1977. P. 77.

Bibliography (transliterated)

1. Selikhov Yu. A., Ryshchenko I. M., Gorbunov K. O. Intehratsiia teploobminu vysokotemperaturnoi poverkhni. *Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia*. 2024. No. 3. P. 3–11.
2. Selikhov Yu. A., Gorbunov K. O., Pilnyk I. V. Metodyka eksperymentalnoho doslidzhennia lokalnykh umov nestatsionarnoho teploobminu. *Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia*. 2024. No. 3. P. 12–19.
3. Abramzon A. A. Poverkhnostno-aktyvnye veshchestva. Leningrad. 1981. 304 p.
4. Hlosarii terminiv z khimii. Ukladachi Y. Opeida, O. Shvaika. In-t fizyko-orhanichnoi khimii ta vuhlekhimii im. L. M. Lytvynenka NAN Ukrainy, Donetskyi natsionalnyi universytet. Donetsk. Veber. 2008. 738 p.
5. DSTU ISO/TR 896:2007. Rechovyny poverkhnevo-aktyvni. Naukova klasyfikatsiia.
6. Aivazov V. V. Praktykum po khymii poverkhnostnykh yavleniy u adsorbtsyy. Moskva. Vysshaia shkola. 1973. 206 p.
7. Lange K. R. Poverkhnostno-aktyvnye veshchestva. Syntez, svoistva, analiz, pry-meneniye. Sankt-Peterburg. 2005. 240 p.
8. Airapetian T. S. Vodne hospodarstvo promyslovykh pidpriemstv. Navchalnyi posibnyk. Kharkiv. KhNAMH. 2010. 280 p.
9. Bredykhin V. M., Maniak M. O., Smyrnov V. O., Pozhuiev V. I., Chervonyi I. F., Hrytsai V. P. Metalurhiia kolorovykh metaliv. Pidruchnyk. Chastyna 7. Vtorynna metalurhiia kolorovykh metaliv. Zaporizhzhia. ZDIA. 2009. 452 p.

10. Eismondt K. A., Shustov A. V. Polucheniye y pryimeneniye zhydkostno-vozdushnykh zakalochnykh sred. *Metallovedeniye i termycheskaia obrabotka metallov*. 1980. No. 11. P. 43–45.
11. Shynoda K., Nakahava T., Tamamusy B. Kolloydnye poverhnostno-aktyvnye veshchestva. Moskva. 1966. 276 p.
12. Poverkhnostno-aktyvnye veshchestva. Spravochnyk. Pod red. A. A. Abramzona, H. M. Gaevogo. Leningrad. 1979. 754 p.
13. Kyenskaia K. Y., Sardushkyn M. V., Yarovaia O. V., Avramenko H. V. Svoistva i pryimeneniye poverkhnostno-aktyvnykh veshchestv. Kurs lektsiy. Moskva. RKhTU im. D. I. Mendeleeva. 2016. 136 p.
14. Mchedlov-Petrosian N. O., Lebed A. V., Lebed V. Y. Kolloydnye poverkhnostno-aktyvnye veshchestva. Uchebno-metodycheskoe posobyе. Kharkov. KhNU imeni V. N. Karazyna. 2009. 72 p.
15. Belousov V. P., Morachevskiy A. H. Teploty smesheniya zhydkostei. Moskva. *Khymiya*. 1970. 256 p.
16. Mizikar E. A. Spray cooling investigation for continuous casting of billets and blooms. *Iron and Steel Engineer*. 1970. Vol. 47. No. 6. P. 53–60.
17. Dolzhenkov Y. E., Verboloz V. D. Spreiernoє okhlazhdeniє fasonnykh profylei prokata pry termycheskom uprochnenyy. *Metallurgiya y koksokhymiya*. 1973. Vyp. 36. P. 90–92.
18. Boryshanskyi V. M. Voprosy teplootdachy dvuhfaznykh sred. Moskva. GEI. 1961. 392 p.
19. Yuen M. C., Chen L. W. Heat transfer measurements of evaporating liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1978. Vol. 21. No. 5. P. 537–542.
20. Dynier A. Obzor lyteratury po teploperedache pry struinom okhlazhdenyy. *Chernye metally*. 1976. No. 4. P. 26–29.
21. Heat transfer in two-phase flows. Karman Institute for Fluid Dynamics. Rhode-Saint-Genèse. 1971. P. 452–463.
22. Jang W. J. Vaporization and combustion of binary liquid drops on heated surface. Tokyo Joint Gas Turbine Congress. 1977. P. 77.

УДК 621.016

Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор, М. В. Ільченко, канд. техн. наук, доцент,  
К. В. Перемот, студент, Е. Р. Нагорний, аспірант, І. В. Пільник, аспірант,  
В. Г. Рись, аспірант

### **ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ОХОЛОДЖЕНІ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ**

Впровадження нових технологій та штучного інтелекту змусило передові країни подивитися по-новому на такі проблеми. У металургії при виробництві термозміцненого прокату широкого поширення набули системи, в яких необхідний тепловий стан виробів забезпечується за рахунок охолодження високотемпературних поверхонь розпиленою рідиною. У перехідних режимах роботи турбоустановок АЕС у проточній частині турбін має місце нестационарна теплова взаємодія поверхонь корпусних елементів з

диспергованою рідкою фазою вологої насиченої пари. При цьому точність розрахунків термічних напруг та деформацій у зазначених елементах корпусу турбіни, виконаних на стадії проектування, а, отже, забезпечення надійності роботи турбоустановки в умовах її експлуатації істотно визначається повнотою інформації про граничні умови теплообміну.

Вочевидь, що у разі забезпечення заданих механічних характеристик прокату, зниження енерговитрат і витрати охолоджувача, вибір режимно-геометричних характеристик системи зміцнення визначається достовірністю відомостей про густину теплового потоку у процесі нестационарного теплообміну диспергованої рідини з поверхнею виробу.

Основним охолоджувачем вище названих процесів є вода. В науковій літературі багато публікацій про охолодження високотемпературної поверхні диспергованою водою. Але ніяких наукових досліджень охолодження високотемпературної поверхні диспергованим розчинником, в склад якого входить вода з різною концентрацією поверхнево-активних речовин (ПАР) ми не знайшли.

Краплі води на високотемпературній поверхні мають круглу форму тому, що у воді найбільший поверхневий натяг на межі вода – поверхня. Всі поверхневі явища пов'язані з особливостями поверхні поділу фаз і виникають на межі розподілу між двома або велику кількість двох контактуючих фаз. Вони обумовлені поверхневою енергією та властивостями дисперсних систем.

Було частково визначено теоретично та експериментально ознаки впливу поверхневого натягу диспергованого розчинника, в склад якого входить вода з різною концентрацією поверхнево-активних речовин (ПАР) на високотемпературну поверхню.

Далі треба буде провести експериментальні та розрахункові роботи для визначення густини теплового потоку у процесі нестационарного теплообміну диспергованого розчинника с поверхнею виробу.

**Ключові слова:** термозміцнений прокат, охолодження водою, екологоенергетична ефективність, плівкове охолодження газові турбіни, диспергована вода, диспергований розчинник, поверхнево-активні речовини (ПАР), поверхневі явища, контактуючі фази, поверхнева енергія, адсорбція, десорбція, гетерогенна система, вільна поверхнева енергія.

Yu. A. Selikhov, M. V. Pchenko, K. V. Peremot, E. R. Nagorniy, I. V. Pilnyk, V. G. Rys

## **INTEGRATION OF HEAT TRANSFER OF HIGH-TEMPERATURE SURFACES WITH COOLING BY SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES**

The introduction of new technologies and artificial intelligence has forced advanced countries to take a fresh look at the following problems. In metallurgy, in the production of heat-strengthened rolled products, systems have become widely used in which the required thermal state of products is ensured by cooling high-temperature surfaces with a sprayed liquid. In transient operating modes of nuclear power plants turbine units, non-stationary thermal interaction of the surfaces of the housing elements with the dispersed liquid phase of wet saturated steam occurs in the flow path of the turbines. At the same time, the accuracy of calculations of thermal stresses and deformations in the specified elements of the turbine housing, carried out at the design stage, and, consequently, ensuring the reliability of the turbine unit under its operating conditions, is largely determined by the completeness of information on the boundary conditions of heat exchange. It is obvious that in the case of ensuring the speci-

fied mechanical characteristics of the rolled product, reducing energy costs and coolant consumption, the choice of the regime-geometric characteristics of the hardening system is determined by the reliability of the information on the density of the heat flow in the process of non-stationary heat exchange of the dispersed liquid with the surface of the product.

The primary coolant for the above processes is water. There are numerous publications in the scientific literature on cooling high-temperature surfaces with dispersed water.

However, we did not find any scientific studies on cooling a high-temperature surface with a dispersed solution containing water with varying concentrations of surfactants. Water droplets on a high-temperature surface have a round shape because in water the surface tension is greatest at the water-surface interface. All surface phenomena are associated with the features of the phase separation surface and arise at the boundary of distribution between two or more contacting phases. They are determined by surface energy and properties of dispersed systems.

The influence of surface tension of a dispersed solution containing water with different concentrations of surfactants on a high-temperature surface was partially determined theoretically and experimentally. Next, it is necessary to conduct experimental and computational work to determine the heat flow density in the process of non-stationary heat exchange of the dispersed solution with the surface of the product.

**Keywords:** heat-strengthened rolled products, cooling, efficiency in gas, turbine engineering, glass furnace bath walls, dispersed concentration (surfactant), surface phenomena, distribution boundary, surface energy, properties of dispersed systems, adsorption, desorption, heterogeneous system, free surface energy.

*Отримано редколегією 27.09.2025*

**Селіхов Юрій Анатолійович (Yurii Selikhov)**, канд. техн. наук, доцент, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-8679-2752>;

**Льченко Марія Володимирівна (Mariia Pshenko)**, канд. техн. наук, доцент, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-1353-2108>;

**Перемот Карина Віталіївна (Karuna Peremot)**, студентка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

**Нагорний Ельдар Рамісович (Eldar Nagorniy)**, аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0001-9652-5252>;

**Пільник Іван Вадимович (Ivan Pilnyk)**, аспірант НТУ «ХПІ», <https://orcid.org/0009-0003-0583-0353>;

**Рись Віталій Григорович (Vitalii Rys)**, аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0007-7638-0504>.