

УДК 621.165

## КОМПЛЕКСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПАРОВИХ ТУРБІНАХ

<sup>1</sup> А. О. Тарелін,  
член-кор. НАН України  
[tarelin@ipmach.kharkov.ua](mailto:tarelin@ipmach.kharkov.ua)  
ORCID: 0000-0001-7160-5726

<sup>2</sup> О. Weres, д-р філос.

<sup>1</sup> Інститут проблем  
машинобудування  
ім. А. М. Підгорного  
НАН України,  
61046, Україна, м. Харків,  
вул. Пожарського, 2/10

<sup>2</sup> Geobrinelab,  
89502, USA, Nevada, Reno, Mill  
str., 4840, Unit 2

*У статті розглядаються комплексні дослідження в галузі електризації вологопарового потоку в турбіні. Представлено аналіз, узагальнено досвід проведених досліджень на лабораторних стендах і натурних об'єктах (ТЕЦ і ТЕС) України, США. Показано, що в процесі електризації пари щільність зарядів у потоці може досягати дуже високих значень (на порядок вищих, ніж у грозовій хмарі), доведено, що це явище негативно впливає на роботу турбіни. Наведено статистичні дані зарядоутворення парового потоку в циліндрі низького тиску турбіни. Представлено результати дослідження зі встановлення таких основних електрофізичних чинників впливу на поверхневу міцність лопатки, як електричні поля, густина зарядів і їхня полярність. Спираючись на це підкреслено, що такі фактори, як наявність позитивно зарядженого потоку пари, постійних і змінних електричних полів, що найчастіше реєструвалися на діючих турбінах ТЕС і ТЕЦ, значно (у два і більше разів) інтенсифікують ерозійно-корозійні процеси на металевих поверхнях лопаток, знижуючи тим самим їхній робочий ресурс. Термодинамічні процеси вивчаються як в умовах природної електризації високошвидкісного потоку, що знижують показники ефективності приблизно на 0,3-0,35%, так і під час впливу штучно створених електричних зарядів, які дають змогу підвищити ефективність процесу розширення пари в турбіні на 2 і більше відсотки. Розглядаються різні варіанти локального введення електричної енергії для іонізації пари в турбіні. При цьому наголошується, що для практичної реалізації цих пропозицій у подальшому потрібні ретельне конструкторське доопрацювання і випробування на модельних і натурних установках. Досліджуються також водно-хімічні режими у контексті їхнього впливу на процес зарядоутворення потоку, показники надійності й економічності турбіни. Експериментально на турбоустановці 800 МВт у США було показано, що зміна рН середовища впливає на інтенсивність і полярність зарядоутворення потоку пари. У статті увагу приділено фізичним особливостям цього явища і наголошено на важливості й впливі цих процесів на характеристики міцності лопаток. Наводиться інформація про такі нові методи і технології, що забезпечують збільшення експлуатаційної ефективності й надійності вологопарових турбін, як способи введення і відведення електричної енергії в потік; раціональний вибір водно-хімічних режимів; нейтралізація об'ємного заряду та ін. Комплексні електрофізичні дослідження, що розглядаються разом із тепловими процесами, можна охарактеризувати як новий науковий напрям у теорії парових турбін – теплоелектрофізика.*

**Ключові слова:** парова турбіна, електризація, статистика, ефективність, міцність.

### Вступ

Парові турбіни – це теплові двигуни, в яких тепла енергія пари перетворюється на механічну. Високотемпературна пара високого тиску, що проходить через проточну частину турбіни, розширюється зі збереженням близько і надзвукових швидкостей, контактуючи при цьому з металевими конструкціями проточної частини циліндра низького тиску (ЦНТ). Внаслідок цього потік вологої пари інтенсивно електризується. Це відбувається виключно за рахунок електризації крапель, що містяться в паровому потоці. Зіткнення краплі води з робочою поверхнею лопатки або стінками патрубку під час руху викликає електризацію як самої краплі, так і металевої поверхні. Краплі води можуть набувати електричного заряду при відриві від поверхні металу або води, при дробленні великої краплі під час руху в потоці. У разі великої щільності зарядів у проточній частині ЦНТ турбіни ці процеси можуть ініціювати електричні розряди й іонізацію парового потоку, що, у свою чергу, може помітно впливати на властивості пари, теплообмінні процеси, і, враховуючи наявність агресивного електризованого робочого середовища, здатні інтенсифікувати ерозійно-корозійні деградаційні явища в металевих конструкціях. По суті, у цій частині турбіни процеси, що відбуваються, слід розглядати як теплоелектрофізичні, в яких вплив електризації не можна не враховувати.

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.  
© А. О. Тарелін, О. Weres, 2023

При роботі вологопарових турбоустановок частина їх теплової енергії через електризацію потоку вологої пари перетворюється на електростатичну енергію потоку. Величина втрат енергії від цього хоч і невелика, проте, як показали проведені дослідження, дуже відчутний вплив електризації на експлуатаційні показники турбоагрегату, а отже, він є актуальним і важливим як з практичної, так і з наукової точки зору.

Одним з основних завдань досліджень, представлених у цій роботі, була оцінка рівня електризації парового потоку на турбінах ТЕС і ТЕЦ, що діють, і визначення постфакторних впливів зарядженого потоку на експлуатаційні показники енергоустановки.

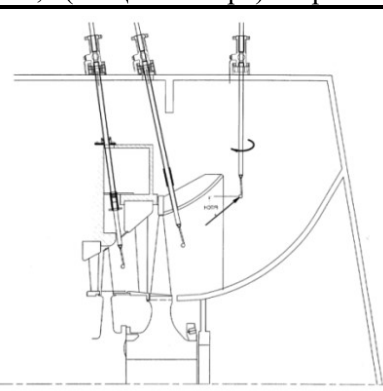
### Статичні показники електризації

Комплексні дослідження, проведені співробітниками ПММаш НАН України за участю компаній Sonoma Research й EPRI США на різних ТЕС та ТЕЦ України, США, показали, що в процесі електризації пари щільність зарядів у потоці може досягати дуже високих значень [1].

У 1992 р. під час проведення досліджень на паровій турбіні Т-37/50-8,8 (ТЕЦ-2 «Есхар») вперше виявлено наявність зарядів у паровому потоці турбіни. Виміряна щільність зарядів за останнім ступенем турбіни виявилася на порядок вищою, ніж у грозовій хмарі і склала  $10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup> при напруженості електричного поля до  $2 \times 10^5$  В/м. Встановлено також факт існування електромагнітного поля в патрубку турбіни й виміряно його спектральний склад.



а



б

Рис. 1. Траверсування парового потоку електричними зондами: а – установка спеціальних клапанів; б – установка рухомих зондів

У 1997 р. у США на паровій турбіні 800 МВт ТЕС Навахо (Арізона) виконано траверсування парового потоку в проточній частині турбіни рухомими електричними зондами (рис. 1).

Встановлено, що перед останнім ступенем щільність зарядів становила  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  Кл/м<sup>3</sup>, а за останнім ступенем –  $10^{-4}$  Кл/м<sup>3</sup>.

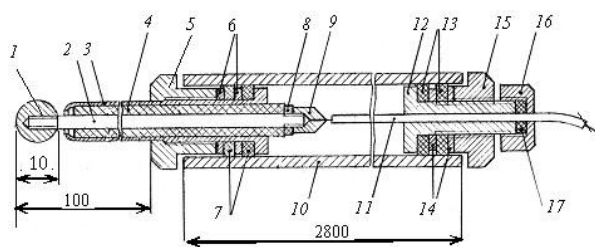


Рис. 2. Електричний зонд:

- 1 – приймальний елемент (сфера); 2 – електрод; 3 – корпус;  
4 – ізолятор; 5, 8, 9, 15, 16 – гайка; 6, 14 – шайба;  
7, 13, 17 – гумове кільце; 10 – штанга; 11 – кабель; 12 – втулка

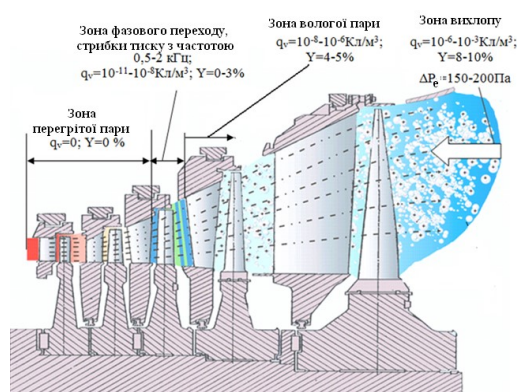


Рис. 3. Зміна параметрів парового потоку у проточній частині ЦНТ:

Y – вологість пари;  $q_v$  – об'ємна щільність зарядів;  
 $\Delta P_e$  – протитиск, що створюється об'ємним зарядом

Подібні дослідження з використанням розробленого інструментарію у вигляді електричних зондів (рис. 2) проводилися й на інших турбінах різного призначення (теплофікаційні й конденсаційні) й потужностей (50; 100; 200; 300; 320; 400; 800 МВт).

Узагальнюючи результати всіх досліджень у цій галузі, можна резюмувати, що розподіл щільності зарядів у проточній частині (рис. 3) і в конденсаторі вологопарових турбін представляється:

- на початку зони фазового переходу  $10^{-11}$ – $10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>;
- перед останнім ступенем  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  Кл/м<sup>3</sup>;
- за останнім ступенем  $10^{-6}$ – $10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup>;
- у зоні конденсатора  $10^{-9}$ – $10^{-7}$  Кл/м<sup>3</sup>.

Встановлений факт електризації вологопарового потоку в турбіні визначив необхідність проведення комплексних досліджень впливу цих явищ на показники надійності й економічності турбін.

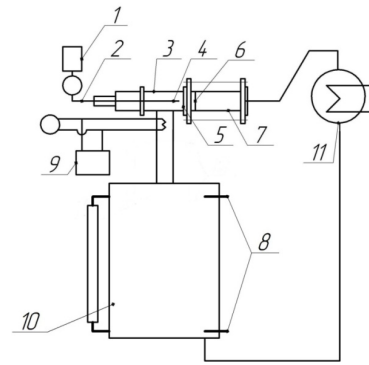
#### Показники міцності

У зв'язку з цим дуже важливими є вперше отримані експериментально результати встановлення існування істотного впливу агресивного електризованого парового середовища на поверхневу міцність робочих лопаток.

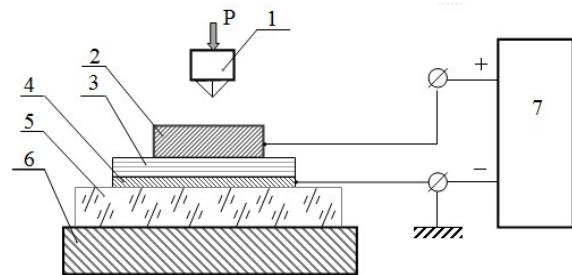
Для проведення вищезгаданих досліджень було створено вологопаровий стенд із використанням штучної іонізації пари (рис. 4), а також механо-електричний стенд впливу електричних полів на металеві зразки (рис. 5). Випробування проводилися на різних термодинамічних й електричних режимах. Докладно їх результати розглянуто у роботах [2, 3].

Проведені дослідження показали, що такі фактори, як наявність позитивно зарядженого потоку пари, постійних і змінних електричних полів, що найчастіше реєструвалися при проведенні експериментальних досліджень на діючих турбінах ТЕС, значно (у два та більше разів) інтенсифікують ерозійно-корозійні процеси на металевих поверхнях лопаток, знижуючи цим їх робочий ресурс. При цьому зміна поверхневої міцності матеріалу при електризації потоку відбувається переважно через зростання (5–10 разів) абсорбції водню в метал і зміни його поверхневої енергії під впливом електричних полів, зумовленої зміною щільності електронів.

Результати проведених досліджень впливу на поверхневу щільність лопаток залежно від площинності потоку наведено на рис. 6.

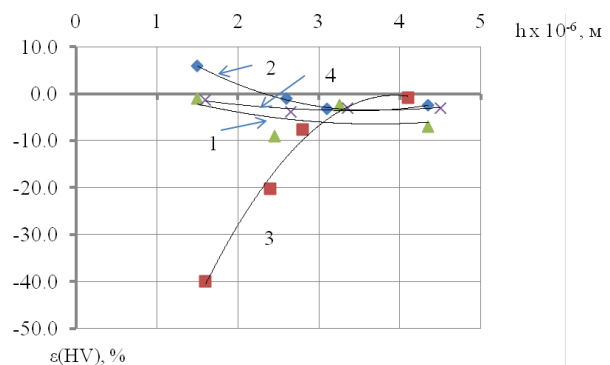


**Рис. 4. Умовна схема базових елементів парової установки з іонізацією пари коронним розрядом:**  
1 – джерело високої напруги; 2 – високовольтне введення; 3 – іонізаційна парова камера; 4 – коронуючий електрод; 5 – сопло; 6 – модуль кріплення зразка сталі; 7 – камера обробки зразків; 8 – датчики рівня води; 9 – пароперегрівач; 10 – котел; 11 – конденсатор



**Рис. 5. Схема вимірювання мікротвердості поверхні зразка в електричному полі:**

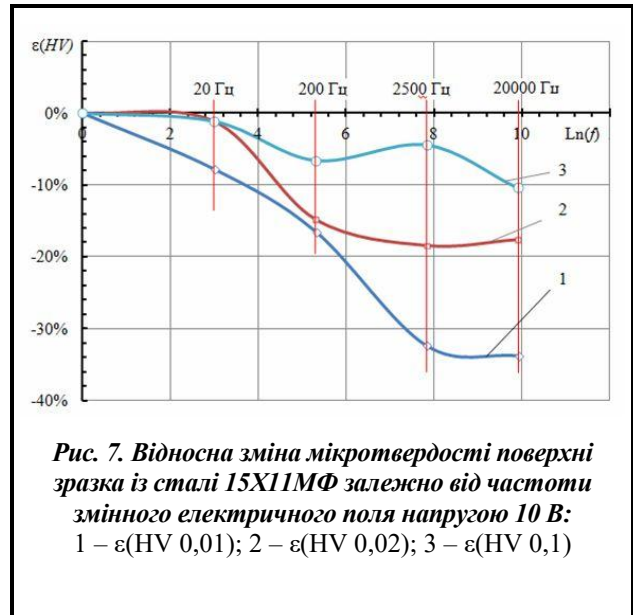
- 1 – індентор; 2 – зразок; 3 – стеклотекстоліт;
- 4 – фольга; 5 – ізолятор; 6 – предметний стіл мікротвердоміра; 7 – джерело напруги



**Рис. 6. Зведений графік відносної зміни мікротвердості за глибиною поверхні зразків, оброблених у вологій парі на режимах:**  
1 – нейтральна волога пара; 2 – негативно заряджена волога пара; 3 – позитивно заряджена волога пара; 4 – квазінейтральна пара (електризація в бар'єрному розряді)

Із представлено на рис. 6 видно, що вплив позитивно зарядженого потоку (на відміну від негативного) знижує властивості міцності поверхневого шару лопаткового матеріалу на 30–50%. У даному випадку необхідно звернути увагу на ту обставину, що, як показали численні натурні дослідження, у зоні останніх ступенів полярність пари, як правило, має позитивний знак, а отже, і найпомітнішу деградацію.

Оскільки при проведенні досліджень на ТЕЦ «Есхар» [1] встановлено, що в ЦНТ у зоні електризації вологої пари виникають змінні електромагнітні поля в широкому діапазоні частот, то було також вивчено вплив змінних електричних полів із частотами 20, 200, 2500 та 20000 Гц і напругою 10 В на мікротвердість поверхні  $\varepsilon(HV)$  призматичного зразка із сталі 15X11МФ. Мікротвердість визначали при трьох різних навантаженнях на індентор: 10, 20 та 100 гс. Результати вимірів у вигляді графіків представлені на рис. 7.



**Рис. 7. Відносна зміна мікротвердості поверхні зразка із сталі 15X11МФ залежно від частоти змінного електричного поля напругою 10 В:**  
1 –  $\varepsilon(HV 0,01)$ ; 2 –  $\varepsilon(HV 0,02)$ ; 3 –  $\varepsilon(HV 0,1)$

На графіках видно, що змінні електричні поля в діапазоні від 200 Гц до 20000 Гц значно впливають на пластичну деформацію поверхневого шару лопаткової сталі 15X11МФ. Найбільше відносне зниження мікротвердості спостерігається при навантаженні на індентор 10 г (HV 0,01) до 30% і при навантаженні на індентор 20 г (HV 0,02) до 18%. Отримані результати показують, що електромагнітні поля також негативно впливають на опір металу.

Комплексний аналіз впливу зарядів потоку та його магнітних полів на поверхневу міцність лопаток дозволяє стверджувати, що за високої щільності зарядів експлуатаційний ресурс лопаток може зменшитися на 50 і більше відсотків.

### Показники ефективності

При розгляді питання про рівень впливу природної електризації потоку на показники економічності турбіни бралось до уваги те, що це явище, у принципі, могло бути ефективним як фактор додаткового утворення ядер конденсації в переохолодженій парі. Однак таке припущення під час розгляду реальних процесів, що відбуваються у турбіні, не підтвердилося. Це можна пояснити тим, що в початковій зоні фазового переходу, де переохолодження зазвичай досягає максимального рівня, кількість природно утворюючихся зарядів, як було експериментально встановлено (рис. 3), несуттєва, і вони майже не впливають на тепломасообмінні процеси. У зоні ж останніх ступенів, навпаки, рівень переохолодження вже мінімальний, а щільність зарядів максимальна, що суттєво зменшує можливий ефект зниження переохолодження від електризації. Тим більше, що на цей процес у даній зоні накладається ще додатковий негативний фактор – електростатичні сили гальмування потоку ( $\Delta P_e$ , рис. 3). У цілому, враховуючи всі можливі процеси, що відбуваються при перебігу зарядженого потоку (електростатичні сили гальмування потоку у вихлопній частині, збільшення нестационарності потоку за рахунок нерівномірного розподілу зарядів і електричних полів у проточній частині, електростатичну силу краплі, спрямовану до заземлених ділянок проточної частини та ін.), можна оцінити величину втрат теплової енергії в ЦНТ турбіни від негативного впливу електризації, вони дорівнюють приблизно 0,3–0,35%.

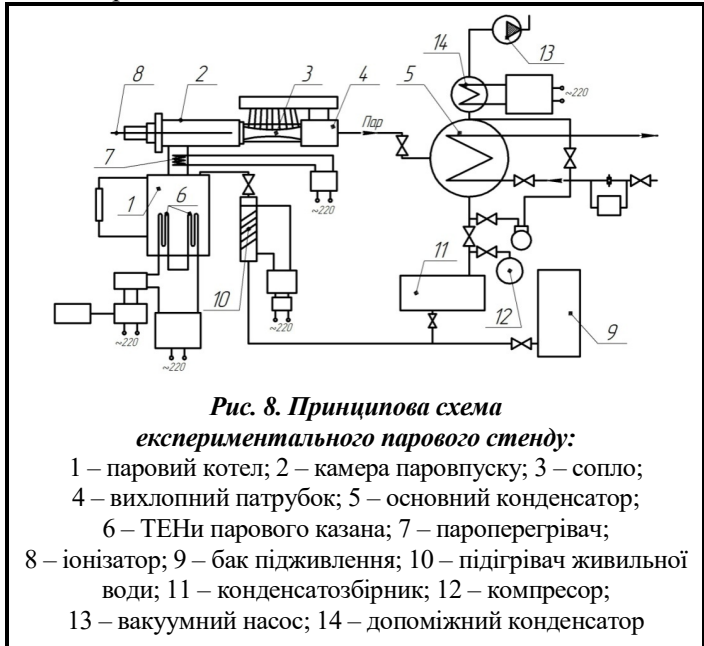
Динаміка зростання природного зарядоутворення в проточній частині ЦНТ, як раніше вже значалося, відбувається у зворотному напрямку необхідної динаміки утворення додаткових центрів конденсації, що сприяє зниженню рівня переохолодження пари. Тому другий напрям, представлений у цій роботі, – штучна іонізація пари – розроблявся вже з урахуванням накопиченого досвіду й бачення недоліків природної електризації. При цьому задача раціонального управління процесами зарядоутворення й іонізації пари формувалася і вирішувалася в наступній постановці: підвищення ефективності процесу розширення парового потоку в турбіні має здійснюватися за рахунок його активації (або деактивації) шляхом локального введення (або виведення) у робоче середовище електричної та електромагнітної енергії. Численні стендові й частково натурні випробування показали високу ефективність за-

пропонованого методу штучної іонізації парового потоку. Як свідчать розрахунки й результати експериментальних випробувань, ККД вологопарових турбін у цьому випадку може бути підвищений на два і більше відсотки за рахунок зниження рівня переохолодження й конденсаційної нестационарності, зменшення плівкової конденсації та концентрації великодисперсної вологи тощо.

Зокрема, нижче наведено результати експериментальних досліджень на термодинамічному паровому стенді (рис. 8).

Під час експерименту з визначення впливу іонізації на ефективність процесу розширення використовувався коронний електророзрядник із дотриманням наступних основних характеристик сопла й параметрів пари:

- витрата пари через сопло  $G_0=0,00115$  кг/с;
- площа вихідного перерізу сопла  $F=1,418 \times 10^{-5}$  м<sup>2</sup>;
- тиск пари перед соплом  $p_0=59$  кПа;
- тиск у зоні раптового розширення  $p_k=5,99$  кПа;
- теплота випаровування у зоні раптового розширення  $\chi=2415,3$  кДж/кг;
- питомий струм коронного розряду в експерименті  $J=3,2 \times 10^{-3}$  А/(кг/с).

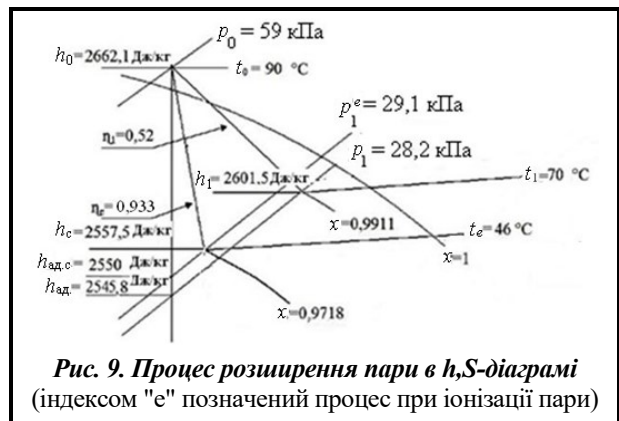


**Рис. 8. Принципова схема експериментального парового стенду:**

- 1 – паровий котел; 2 – камера паровпуску; 3 – сопло;
- 4 – вихлопний патрубок; 5 – основний конденсатор;
- 6 – ТЕНи парового казана; 7 – пароперегрівач;
- 8 – іонізатор; 9 – бак підживлення; 10 – підігрівач живильної води; 11 – конденсатозбірник; 12 – компресор;
- 13 – вакуумний насос; 14 – допоміжний конденсатор

Дослідження процесу розширення пари в осесиметричному соплі показали, що характер колювання тиску суттєво змінюється у процесі іонізації пари. При цьому під дією електророзрядного пристрою з нейтральних молекул пари утворюються заряджені частинки, що інтенсифікують процес конденсації. Стрибок тиску, який спостерігався при природному розширенні, за рахунок іонізації майже повністю нівелюється. Внаслідок цього втрати в соплі, пов'язані зі стрибком конденсації та переохолодженням пари, знижуються.

При іонізації парового потоку рівень сухості пари на врізі сопла знижується з 0,991 до 0,9718, а ентальпія зменшується з 2601,5 до 2557,5 кДж/кг (рис. 9). У результаті кількість теплоти фазового переходу, використаної в соплі, зростає на 44 кДж/кг, що збільшує ККД процесу розширення з 0,52 до 0,933. Максимальна вологість нейтральної пари на виході із сопла не перевищує 1,5% (при адіабатичній – 3,5%). В іонізованій парі вологість може досягати значення 3,4%, що дуже близько до адіабатичної, тобто процес наближається до рівноважного.

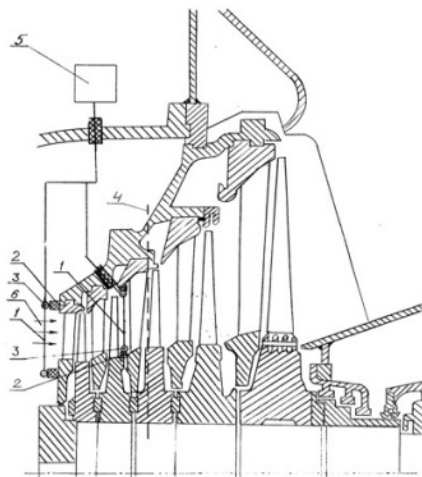


**Рис. 9. Процес розширення пари в h,s-діаграмі (індексом "e" позначений процес при іонізації пари)**

Слід зазначити, що такий процес і зростання

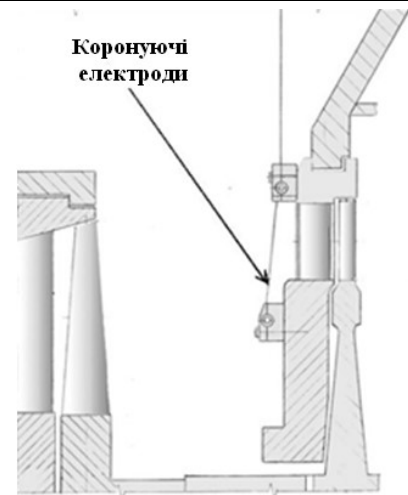
ККД відповідають лише даному соплу. Тим не менш, можна стверджувати, що завдяки більш повному використанню теплоти конденсації при іонізації пари тенденція збільшення ККД повинна зберегтися для будь-якого процесу розширення пари, у тому числі і в реальних турбінах.

І все-таки постає питання: чи можна в натурних умовах зменшити величину переохолодження за рахунок штучної іонізації. Як підтвердження такої можливості був проведений натурний експеримент на турбіні Т-250/300-240 в зоні останнього ступеня. Для управління іонізацією потоку використовувався нейтралізатор об'ємного заряду, на який у так званому активному режимі була можливість подавати високу напругу. Експеримент показав, що іонізація потоку пари за останнім ступенем знижує процес переохолодження, що фіксується підвищенням температури майже на 1 °С.



**Рис. 10. Розміщення коронуючих електродів для іонізації парового потоку в проточній частині турбіни:**

1 – електрони, що коронують; 2 – ізолятори; 3 – колектор; 4 – зона початку конденсації; 5 – високовольтне джерело; 6 – паровий потік



**Рис. 11. Розміщення іонізаторів парового потоку в проточній частині турбіни перед першим ступенем ЦНТ**

У процесі досліджень розроблено й запропоновано різні варіанти локального введення електричної енергії для іонізації пари в турбіні [4] (рис. 10, 11).

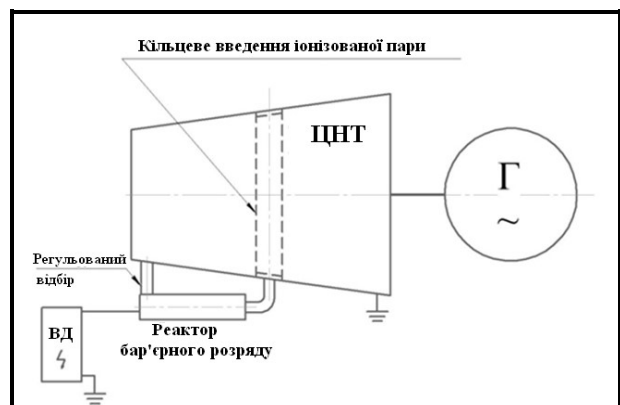
Проведені раніше дослідження про «живучість» під час транспортування іонізованої пари з використанням бар'єрного розряду [5] показали перспективність компонування, представленого на рис. 12, але при цьому потрібні подальше опрацювання й деталізація цієї пропозиції. У цьому варіанті генерація зарядів пари здійснюється поза проточною частиною.

Для зниження негативного впливу електростатичних сил гальмування потоку в зоні останнього ступеня передбачається локальне відведення енергії за допомогою нейтралізаторів зарядів [6, 7], які пройшли успішне випробування на ТЕС та ТЕЦ (рис. 13).

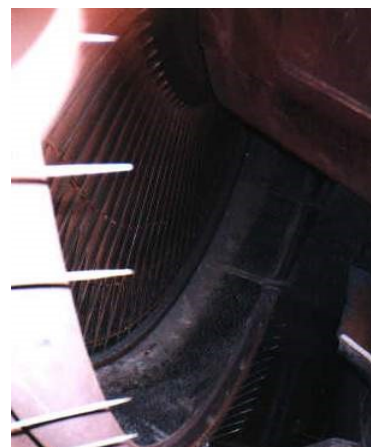
Конструктивно такий нейтралізатор може бути виготовлений у вигляді двох напівкільцевих електродів (рис. 13), що встановлюються, наприклад, на опорних ізоляторах зовнішньої стінки вихлопного дифузора.

Результат нейтралізації потоку за останнім ступенем за рахунок такого відведення електричної енергії зменшує протитиск  $\Delta P_e$ , знижує пульсації потоку, що виникають від електростатичних процесів, підвищуючи тим самим ефективність і надійність роботи турбоагрегату.

Рівень ККД енергоблоків завдяки управлінню тепловими процесами шляхом активізації та деактивізації електричних зарядів у паровому потоці може бути підвищений на 2 та більше відсотки.



**Рис. 12. Схема зовнішнього підведення іонізованої пари в проточну частину**



**Рис. 13. Загальний вигляд нейтралізатора на вихлопі турбіни**

Запропонований у роботі метод штучної іонізації парового потоку та його використання для вологопарових турбін з наукового погляду досить обґрунтований, а його ефективність підтверджена результатами проведених численних досліджень і є гарною базою для подальшого практичного його доведення та конструкторського вдосконалення нових парових турбін.

### Водно-хімічні режими та зарядоутворення

У роботі також було досліджено й вивчено можливості управління тепловими процесами в турбіні за допомогою корекції водно-хімічних режимів, точніше рН середовища. На жаль, результати всіх спеціально проведених лабораторних і натурних випробувань у цьому напрямі показали, що зміна рН середовища майже не впливає на інтенсифікацію утворення процесної вологи в проточній частині, а отже, і на процес розширення пари в турбіні та її ефективність.

Під час експерименту на турбоустановці 800 МВт у США було встановлено факт впливу рН середовища на інтенсивність і полярність зарядоутворення потоку пари (рис. 14).

Видно, що збільшення рН від 8,2 до 8,8 од. спричиняє зменшення струму зонда до нуля, а при подальшому збільшенні рН до 9,2 струм зонда змінює полярність на протилежну і різко зростає. На підставі результатів проведених експериментів можна зробити висновок, що, змінюючи рН живильної води, можна керувати процесом зарядоутворення у вологопаровому потоці турбіни.

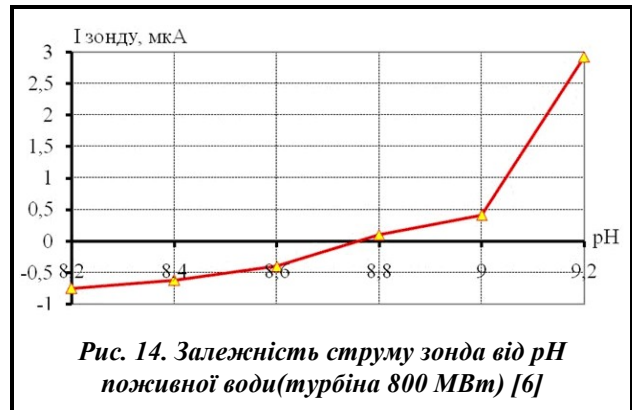


Рис. 14. Залежність струму зонда від рН поживної води (турбіна 800 МВт) [6]

Ці процеси, на наш погляд, не пов'язані з процесною вологою, а є наслідком плівкової конденсації на поверхні лопатки, тобто фактором, що більшою мірою впливає на показники надійності, ніж на економічність. При цьому зміна властивостей (аміновмістні середовища) призводить до зміни сил поверхневого натягу водного (плівкового) конденсату, що, своєю чергою, сприяє як зміні дисперсності крапель, що зриваються з металу, так і ступеня їхньої електризації та полярності, тобто параметрів, які суттєво впливають на поверхневу міцність лопатки.

Розуміння цих процесів відкриває широкі перспективи для розроблення рекомендацій щодо зниження ерозійно-корозійної деградації елементів конструкції турбіни. Зокрема, пропонується обирати аміновміст живильної води з позицій мінімальної густини зарядів у потоці (або з негативною полярністю), а відповідний контроль здійснювати за допомогою електричного зонда (рис. 15).

Технічна реалізація системи пригнічення електризації корекцією водно-хімічних режимів може бути виконана на основі автоматизованої системи з використанням датчика електризації парового потоку. Як показали дослідження, такі заходи призводять до істотного подовження ресурсу робочих лопаток.

Отримані при комплексних дослідженнях відомості про електрофізичні явища в турбіні, і про вплив електризованої пари на поверхневу міцність лопаток стали базовим матеріалом для розроблення нових методів і технологій, що забезпечують збільшення експлуатаційної ефективності й надійності вологопарових турбін.

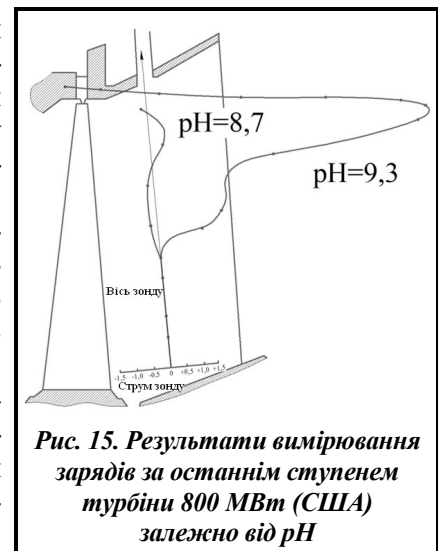


Рис. 15. Результати вимірювання зарядів за останнім ступенем турбіни 800 МВт (США) залежно від рН

На цій основі, крім названих вище методів раціонального вибору ВХР і нейтралізації об'ємного заряду, були також розроблені: спосіб діагностики ерозійно небезпечної крупнодисперсної вологи з використанням електричного зонда [1, 5]; способи зниження ерозійно-корозійної деградації металу від впливу електризованого середовища – випарний, в якому контроль вологовидалення з поверхні лопаток здійснюється електричним зондом [8].

## Висновки

З урахуванням проведених досліджень із вибору раціональних термодинамічних параметрів, за яких іонізація пари є ефективною, цю технологію можна успішно застосувати в геотермальних установках для турбін із такими параметрами пари: температура на вході 80–150 °С і тиск 180–200 кПа.

Розглянуті варіанти можливої практичної реалізації іонізації потоку пари, безумовно, потребують ретельного конструкторського опрацювання й випробувань на модельних і натурних установках, що дасть змогу підвищити ефективність турбоустановки на 2% і більше відсотки, що є стимулювальним фактором для виробників вологопарових турбін.

Викладені результати дослідження визначають загальний підхід до розв'язання задачі зменшення шкідливого впливу заряджених крапель на поверхню металевих деталей: необхідно організувати нейтралізацію іонного потоку до контакту з металевими поверхнями, або радикальне зменшення краплинної вологи, що контактує з поверхнями проточної частини, що збільшить ресурс лопаток приблизно в 2 рази.

Представлені в роботі результати дослідження з електрофізичних явищ у вологопарових турбінах є актуальною і важливою інформацією для фахівців енергетичного профілю. Ці комплексні дослідження в сукупності із тепловими процесами можна охарактеризувати як новий науковий напрям у теорії парових турбін – теплоелектрофізика.

## Література

1. Тарелин А. А., Аннопольская И. Е., Сурду Н. В., Скляр В. П., Михайленко В. Г., Паршина Т. Н., Хиневич А. Е. Энерго- и ресурсосберегающие технологии в энергетике и энергомашиностроении. Киев: Наукова думка, 2016. 272 с.
2. Shubenko O. L., Tarelin A. O. Simulation of the erosion-corrosion destruction process of steam turbine low-pressure cylinder blades. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2023. Vol. 26. No. 1. P. 29–38. <https://doi.org/10.15407/pmach2023.01.029>.
3. Tarelin A. A., Surdu N. V., Nechaev A. V. The influence of wet-steam flow electrization on the surface strength of turbine blade materials. *Thermal Engineering*. 2020. Vol. 67. Iss. 1. P. 60–67. <https://doi.org/10.1134/S0040601520010073>.
4. Tarelin A. O., Skliarov V. P., Weres O. Electrostatic method and device to increase power output and decrease erosion in steam turbines: United States Patent. Patent no. US007252475B2. Date of patent 07 August 2007. 10 p.
5. Тарелин А. А., Скляр В. П. Паровые турбины: электрофизические явления и неравновесные процессы. СПб: Энерготех, 2012. 292 с.
6. Tarelin A. O., Skliarov V. P., Weres O. Device to increase turbine efficiency by removing electric charge from steam. United States Patent. Patent no. US 006698205B2. Date of patent: 02 March 2004. 14 p.
7. Tarelin A. O., Skliarov V. P. Method and apparatus for increasing power generated by a steam turbine by controlling the electric charge in steam exiting the steam turbine. United States Patent. Patent no. US6672825B1. Date of patent 06 January 2004. 24 p.
8. Тарелін А. О., Орловський В. П., Нечаєв А. В. Спосіб запобігання утворенню великодисперсної вологи у вологопаровому турбінному ступеню. Пат. 113131 Україна, МПК<sup>8</sup>F01 D5/18, F01 D25/32; № а201512161; заявл. 08.12.2015; опубл. 12.12.15, Бюл. № 23. 5 с.

Надійшла до редакції 19.06.2023