# Національна академія наук України Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

## Нечаєв Андрій Вікторович

УДК 621.165

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

# ДОСЛІДЖЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЗОВАНОЇ ПАРИ НА РОБОЧІ ЛОПАТКИ ВОЛОГОПАРОВИХ ТУРБІН ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ ЇХ ЗАХИСТУ

## <u>05.05.16 – турбомашини та турбоустановки</u> <u>технічні науки</u>

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук (доктора філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання та відповідне джерело

А. В. Нечаєв

(підпис, ініціали та прізвище здобувача

Науковий керівник: Тарелін Анатолій Олексійович доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України

Харків – 2020

### АНОТАЦІЯ

Нечаєв А. В. Дослідження негативного впливу електризованої пари на робочі лопатки вологопарових турбін та розробка методів їх захисту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки (142 – енергетичне машинобудування) – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків, 2020.

Дисертація присвячена дослідженню фізичної сутності негативного впливу електризованої пари на робочі лопатки вологопарових турбін і розробці методів захисту. Дослідження спрямовано на підвищення ресурсу робочих лопаток вологопарових турбін в умовах виникнення в проточній частині електризації крапельної вологи і електрофізичних явищ.

Актуальність роботи полягає в тому, що розв'язана важлива науковопрактична задача дослідження негативного впливу електризованої пари на робочі лопатки вологопарових турбін і запропоновані методи їх захисту. Дослідження спрямовано на підвищення ресурсу робочих лопаток вологопарових турбін в умовах виникнення в проточній частині електризації крапельної вологи і електрофізичних явищ.

В результаті досліджень вологопарових турбін, що проводяться останніми роками, було виявлено, що під час роботи турбіни складні газодинамічні і теплові процеси супроводжуються виникненням в потоці робочого тіла супутніх електрофізичних явищ. Уперше експериментальні дані щодо електризації вологої пари на натурній турбоустановці були отримані на турбіні Т-37/50-88 ТЕЦ-2 "Есхар" співробітниками ШМаш НАН України під керівництвом А. О. Тареліна в 1998 році. Детальні дослідження електрофізичних явищ в турбінах показали, що вони здатні істотно впливати на робочі процеси в проточній частині низького тиску, в конденсаторі і в цілому на ефективність роботи турбоустановки. Першопричиною

електрофізичних явищ (ЕФЯ) у паровому потоці є спонтанна електризація краплинної вологи, внаслідок чого з'являється об'ємний електричний заряд. Нині встановлено, максимальна густина об'ємного електричного заряду ЩО концентрується за останнім ступенем і може досягати 10<sup>-3</sup> Кл/м<sup>3</sup> за напруженості поля близько 2·10<sup>5</sup> В/м. Об'ємний заряд формується зарядженими краплями, їх електризація залежить від розміру крапель, рН, хімічного складу робочого тіла, а також від матеріалів проточної частини і лопаток турбіни. Як правило, великі ерозійно-небезпечні краплі заряджені позитивно, а дрібні – негативно. Особливістю процесів електризації і нейтралізації крапель в паровому потоці є їх локалізація на поверхні контакту крапель і металу. Внаслідок цього поверхні робочих лопаток, що зазнають інтенсивних механічних навантажень, також зазнають і впливу ЕФЯ, у тому числі електричного поля об'ємного заряду пари, яке має постійну і змінні складові, обумовлені змінами в часі величини і значення об'ємного заряду. Дія такого роду може інтенсифікувати ерозійно-корозійне пошкодження робочих лопаток турбіни, що призведе до скорочення їх ресурсу і зниження ефективності роботи турбіни.

Таким чином, вивчення пошкоджувальної дії пари, що електризується, на міцнісні властивості робочих лопаток парових турбін і розробка методів їх захисту від електрофізичних пошкоджувальних чинників є актуальною науково-практичною задачею.

Метою дисертаційної роботи було встановлення закономірностей і фізичної природи впливу зарядженого парового потоку і супутніх ЕФЯ на міцнісні властивості поверхневого шару сталі лопатки.

Для досягнення мети були поставлені і розв'язані задачі:

1. Встановлення характеру і міри впливу потоку вологої пари, що електризувалася, на вміст водню і мікротвердість в досліджуваних матеріалах.

2. Дослідження впливу постійного і змінного електричного полів на мікротвердість лопаткової сталі за пластичної деформації.

3. Уточнення фізичної моделі механізму пошкоджуваності матеріалу з урахуванням отриманих експериментальних результатів. 4. Розробка рекомендацій з ерозійного і електрохімічного захисту з урахуванням отриманих експериментальних даних.

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел.

У вступі обґрунтовано вибір теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, показано наукову новизну і практичну цінність результатів, наведено загальну характеристику дослідження і перераховано основні результати, які стосуються захисту. Наведено інформацію про публікації та апробацію роботи на наукових конференціях, зв'язок роботи з науковими програмами, темами та особистий внесок здобувача.

У першому розділі наведено огляд науково-технічної інформації щодо феномену спонтанної електризації потоку водяної вологої пари в в каналах і соплах парових машинах. Розглянуто інформацію про феномен електризації металевого тіла в потоці аерозолю. Показано зв'язок цих явищ з процесами електризації пари у вологопарових турбінах. Розглянуто дослідження електризації вологої пари і електрофізичних явищ в парових турбінах та їх вплив на ефективність і надійність. В результаті аналізу наведеної в огляді науково-технічної інформації дійдено висновку, що електризована волога пара і супутні електризації пари ЕФЯ здатні негативно впливати на конструкційні матеріали проточної частини вологопарової турбіни і в першу чергу на поверхні робочих лопаток. В огляді розглянуті основні сучасні методи захисту від негативного впливу парового потоку і показано, що в них не враховуються пошкоджувальні фактори, обумовлені електризацією пари. На основі аналізу стану проблеми сформульовані основні задачі дослідження та шляхи їх розв'язання.

У другому розділі проведено аналіз особливостей впливу іонізованої пари і електричного поля на міцнісні властивості поверхні лопаткової сталі та визначено методологічний підхід дослідження В якості інтегрального методу визначення міцнісних властивостей поверхневого шару лопаткової сталі був обраний метод дюраметрії. Для визначення електрохімічних факторів впливу електризованого парового потоку на лопаткову сталь використовувався метод термодесорбції водню. Надано опис експериментальних стендів та результатів дослідження дії електризованої пари на зразки лопаткових сталей. З отриманих даних випливає, що електризована пара чинить негативний вплив на міцнісні властивості поверхневого шару лопаткової сталі та призводить до зростання абсорбованого водню у металі. Найбільш негативний вплив чинить позитивно електризований потік пари.

У третьому розділі наведено результати досліджень впливу постійних і змінних електричних полів на мікротвердість поверхневого шару зразків лопаткової сталі 15Х11МФ. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки: електричне поле, як постійне так і змінне, що впливає на поверхню зразка лопаткової сталі, змінює мікротвердість за пластичної деформації. Позитивний потенціал, як і в випадку позитивно заряджених крапель, чинить знеміцнювальний вплив на поверхню лопатки сталі. Негативний потенціал впливає менше і в даному випадку приводить до збільшення мікротвердості. Найбільш негативним є вплив змінного електричного поля, проте він проявляється переважно в тонкому (порядку мікрометра) поверхневому шарі. Максимальне зменшення мікротвердості в тонкому поверхневому шарі сталі може досягати величини порядку 30 %. Внаслідок цього за спільної ударів ерозійно-небезпечних крапель і електричного дії поля пошкоджуваність поверхні може виявитися істотно вищою, ніж в разі ударів лише нейтральних крапель.

У четвертому розділі проведено аналіз проблеми фізичної інтерпретації пошкоджуваності поверхневого шару лопатки сталі під впливом іонізованої пари та електричного поля. У розділі розглянуто сучасні моделі механізму пошкоджуваності поверхні сталі за крапельно-ударної ерозії. Показано, що ні в одній із загальноприйнятих моделей в явній формі не враховуються електричний заряд краплі і електрофізичні явища, які виникають під час електризації вологопарового потоку. На прикладі аналізу даних кінетики ерозійного процесу лопатки останнього ступеня вологопарової турбіни в натурних умовах показано вплив ЕФЯ на ерозійний процес і на наводнення лопаткової сталі. Наведені дані дозволяють зробити висновок, що в разі нейтралізації парового потоку і зведення до мінімуму ЕФЯ ерозійна пошкоджуваність лопаток даної турбіни може бути знижена приблизно в 2 рази.

П'ятий розділ містить практичні рекомендації щодо зменшення негативного впливу електричних явищ в робочому тілі на поверхневий шар робочих лопаток. Розглянуто різні варіанти: випарне вологовидалення (оформлений патент), вибір раціонального водно-хімічного режиму (ВХР), нейтралізацію потоку пари, використання покриття направляючих лопаток з матеріалів, які дозволяють мінімізувати електризацію потоку або створюють негативну електризацію, що незначно знижує міцнісні властивості поверхні лопаток. Запропоновані способи зменшення впливу електрофізичних явищ в турбіні на міцнісні властивості лопаткових матеріалів дозволяють комплексно розв'язувати задачу захисту лопаток і збільшення їх робочого ресурсу не менше ніж у 2 рази.

Дисертаційна робота відповідає основним напрямам наукових досліджень Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, які виконані у відділі загально-технічних досліджень в енергетиці.

Результати досліджень стали основою для патента України «Спосіб запобігання утворенню великодисперсної вологи у вологопаровому турбінному ступеню».

Ключові слова: парова турбіна, електризація пари, електрофізичні явища, мікротвердість, наводнення.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажнопарового потока на поверхностную прочность материалов лопаток турбины // Termal Engineering. 2020. №1. С. 72–81.

2. Нечаев А. В. Экспериментальное исследование воздействия постоянного и переменного электрического поля на прочностные свойства поверхностного слоя лопаточной стали // Проблемы машиностроения. 2019. Т.22. №1. С. 4–7.

3. Тарелин А. А., Нечаев А. В., Хиневич А. Е. Электромагнитные излучения в выхлопной части паровой турбины // Проблемы машиностроения. 2017. Т.20. №2. С. 18–21.

4. Тарелин А. А., Орловский В. П., Ковалев А. С., Нечаев А. В. Расчетноэкспериментальные исследования влияния ионизации пара на параметры влажнопарового потока в сверхзвуковом сопле // Проблемы машиностроения. 2016. Т.19. №2. С. 3–10.

5. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажнопарового потока и электрических полей на изменение механических свойств материалов рабочих лопаток турбин // Вісник НТУ "ХПІ". Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 8. С. 107–115.

6. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние катодной поляризации стальной поверхности в парокапельном потоке на изменение ее микротвердости // Вісник НТУ "ХПІ". Энергетические теплотехнические процессы и оборудование. 2013. №14. С. 24–34.

7. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Электрофизические аспекты каплеударного разрушения элементов проточной части паровых турбин // Вісник НТУ "ХПІ". Энергетические теплотехнические процессы и оборудование. 2012. №7. С. 88–96.

 8. Зима И. И., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Магнитные эффекты в воде и их влияние на теплофизические свойства // Вестник инженерной академии Украины.
2010. №3–4. С. 178–183.

9. Зима И. И., Богданов Г. Ф., Нечаев А. В. Роторная спектроскопия потоков больших энергий // Вестник Харьк. политехн. ун-та. 1999. Вып.75. С. 93–97.

10. Спосіб запобігання утворенню великодисперсної вологи у вологопаровому турбінному ступеню/ А. О Тарелін., В. П. Орловський, А. В Нечаєв. власник Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України. – № а 201512161; заявл. 08.12.2015; опубл. 12.12.15, Бюл. № 23. 5 с. 11. Нечаев А. В. Влияние электризованного влажнопарового потока на поверхностную прочность лопаток турбомашин // Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ-2019): матеріали міжнар. наук.-техн. конф., (Харків, 19 черв. 2019 р.). Х.: Харк. нац. ун-т імені В.Н. Каразіна, 2019. С. 51–52.

### ABSTRACT

Nechaiev, Andrii. Study of damaging electrified steam effects on the working blades of wet-steam turbines and development of methods for blade protection.– Manuscript.

A Thesis for the Academic Degree of Candidate of Sciences in Technology, Specialty 05.05.16 – "Turbo-machines and Turbo-Units" (142 – Power Engineering) - A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2020

The thesis deals with the study of the physical nature of damaging electrified steam effects on the working blades of wet-steam turbines and the development of methods for blade protection. The study is aimed at enhancing the service life of the working blades of wet steam turbines under the conditions of the occurrence of electrified condensed moisture and accompanying electrophysical phenomena (EPP) in the flow path.

The relevance of the work is in the fact that an important scientific and practical problem of investigating the damaging electrified steam effects on the working blades of wet-steam turbines and the methods of their protection is solved. The study is aimed at increasing the service life of the working blades of wet-steam turbines in the conditions of occurrence in the flow path of electrified condensed moisture and accompanying EPP.

Recent studies of wet-steam turbines have revealed that during the operation of a turbine, the flow of complex gas-dynamic and thermal processes is accompanied by the occurrence of EPP in the working fluid flow. For the first time, experimental data on the electrification of wet steam were obtained at the T-37/50-88 TPP-2 "Eskhar" field turbine

unit by the staff of IPMash NAS of Ukraine under the direction of A.A Tarelin in 1998. Detailed studies of EPP in turbines have shown that they are able to significantly influence the working processes in the LP flow path, in the condenser, and in general the efficiency of the turbine installation. The primary cause of EPP in the steam flow is the spontaneous electrification of condensed moisture, which results in a volumetric electric charge in the working fluid flow. It is now established that the maximum density of the volumetric electric charge is concentrated behind the last stage, and can reach 10<sup>-3</sup> Kl/m<sup>3</sup> at a field strength of about  $2 \cdot 10^5$  V/m. The volumetric electric charge is formed by charged droplets, with their electrification depending on the size of the droplets, pH, chemical composition of the working fluid, as well as on the materials of the flow path and turbine blades. As a rule, large erosion-hazardous droplets are charged positively, while small ones, negatively. A feature of the processes of electrification and neutralization of the droplets in the steam flow is their localization on the surface where they contact the metal. As a result, the surfaces of the working blades that are influenced by intense mechanical stresses are also influenced by EPP, including the electric field of the volumetric steam charge, which has both constant and variable components that are caused by time variations in the volumetric charge magnitude. The influence of this can intensify the erosion-corrosion damage of turbine blades, which will reduce both their service life and turbine efficiency.

Thus, both the study of the damaging influence of the steam being electrified on the strength properties of steam turbine blades and the development of methods for their protection against damaging factors is an urgent scientific and practical task.

The purpose of the dissertation was to establish the regularities and physical nature of the influence of both the charged steam flow and accompanying EPP on the strength properties of the blade steel surface layer.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved:

1. to determine the nature and extent of the effect of the wet steam flow that was being electrified on the hydrogen content and microhardness in the materials under study;

2. to study the influence of both constant and alternating electric fields on the microhardness of blade steel in plastic deformation;

3. to refine the physical model of the mechanism of damage in materials with taking into account the experimental results obtained;

4. to develop recommendations for erosion and electrochemical protection with taking into account the experimental data obtained.

The dissertation consists of an introduction, five sections, conclusions, and a list of the sources used.

The introduction substantiates the choice of the dissertation topic, formulates the purpose and objectives of the research, shows the scientific novelty and practical value of results, gives a general description of the research, and lists the main results related to the defense. It also provides information on publications and approbation of the thesis in scientific forums, the thesis connection with scientific programs, topics and the personal contribution of the applicant.

The first section provides an overview of the scientific and technical information on the phenomenon of spontaneous electrification of the wet steam flow in steam turbine channels and nozzles. The information about the phenomenon of metal body electrification in an aerosol stream is considered. The connection of these phenomena with the processes of steam electrification in wet steam turbines is shown. The study of the effect of wet steam electrification and EPP in steam turbines on efficiency and reliability is considered. As a result of the analysis of the scientific and technical information presented in the review, it is concluded that both the electrified wet steam and the EPP accompanying steam electrification can adversely affect the structural materials of the flow path of a wet steam turbine and, above all, the surfaces of working blades. The review considers the main modern methods of protection against damaging steam flow effects, and shows that they do not take into account the damaging factors caused by steam electrification. Based on the analysis of the problem state, major research tasks and methods for their solution are formulated.

In the second section, features of the effect of both the ionized steam and electric field on the strength properties of the blade steel surface are considered, and the methodological approach of the study is determined. To integrally determine strength properties, the durametric method was chosen. To determine the electrochemical factors of the effect of electrified steam flow on blade steel, the method of hydrogen thermal desorption was used. The section gives a description of both experimental stands and results of the study of the electrified steam effect on the samples of blade steels. From the obtained data, it follows that the electrified steam has a negative effect on the strength properties of the blade steel surface layer, and leads to an increase in the absorbed hydrogen in the metal. The most negative effect is the positively electrified steam flow.

The third section presents the results of studies of the influence of constant and variable electric fields on the microhardness of the surface layer of 15H11MF blade steel samples. The analysis of the obtained results allows us to draw the following conclusions: the electric field, both constant and variable, that affects the blade steel surface sample, changes microhardness during plastic deformation. The effect of the positive potential, as in the case of positively charged droplets, has a moderating effect on the blade steel surface. The negative potential affects less, and in this case leads to an increase in microhardness. The most negative effect is that of the alternating electric field, however, it is manifested mainly in a thin (in the order of a micrometer) surface layer. The maximum reduction of microhardness in a thin steel surface layer can reach a value of the order of 30%. As a result, the joint impact action of both erosion-hazardous droplets and electric fields may cause the surface damage to be substantially higher than in the case of only neutral droplets.

In the fourth section, the problem of the physical interpretation of the damage of the steel blade surface layer under the effect of both the ionized steam and electric field is analyzed. In the section, modern models of the mechanism of steel surface damage at drop-impact erosion are considered. It is shown that none of the conventional models explicitly take into account the electric charge of a droplet and the EPP that occur during wet-steam flow electrification.

Using the comparative data of the kinetics of the erosion process of the last stage of a wet-steam turbine that were obtained both in natural conditions and at the erosion stand, the EPP effect on the erosion process is shown. These data allow us to conclude that in the case of steam flow neutralization and EPP minimization, the erosion damage of the blades of this turbine can be reduced by about 2 times. The fifth section contains practical recommendations for reducing the negative effect of EPP in the working fluid on the surface layers of working blades. Various variants are considered: evaporative moisture removal (a patent is issued), the choice of a rational water chemistry regime, the use of guide vane materials that allow us to either minimize the electrification of the flow or create negative electrification, which slightly reduces the strength properties of blade surfaces. The proposed methods of reducing the effect of EPP in a turbine on the strength properties of blade materials allow us both to solve the problem of blade protection and to increase their service life by at least 2 times.

The dissertation corresponds to the main directions of scientific research of A. Pidhornyi IPMash of the NAS of Ukraine that was performed in the department of general technical research in the energy sector.

The research results became the basis for the Ukrainian patent «A Way to Prevent Creation of Large Wet Dispersion in Wet Steam Turbine Paths».

Keywords: steam turbine, steam electrification, electrophysical phenomena, microhardness, hydrogenation.

### LIST OF THE PUBLISHED PAPERS ON THE THESIS TOPIC

1. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажнопарового потока на поверхностную прочность материалов лопаток турбины // Termal Engineering. 2020. №1. С. 72–81.

2. Нечаев А. В. Экспериментальное исследование воздействия постоянного и переменного электрического поля на прочностные свойства поверхностного слоя лопаточной стали // Проблемы машиностроения. 2019. Т.22. №1. С. 4–7.

3. Тарелин А. А., Нечаев А. В., Хиневич А. Е. Электромагнитные излучения в выхлопной части паровой турбины // Проблемы машиностроения. 2017. Т.20. №2. С. 18–21.

4. Тарелин А. А., Орловский В. П., Ковалев А. С., Нечаев А. В. Расчетноэкспериментальные исследования влияния ионизации пара на параметры влажнопарового потока в сверхзвуковом сопле // Проблемы машиностроения. 2016. Т.19. №2. С. 3–10. 5. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажнопарового потока и электрических полей на изменение механических свойств материалов рабочих лопаток турбин // Вісник НТУ "ХПІ". Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 8. С. 107–115.

6. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние катодной поляризации стальной поверхности в парокапельном потоке на изменение ее микротвердости // Вісник НТУ "ХПІ". Энергетические теплотехнические процессы и оборудование. 2013. №14. С. 24–34.

7. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Электрофизические аспекты каплеударного разрушения элементов проточной части паровых турбин // Вісник НТУ "ХПІ". Энергетические теплотехнические процессы и оборудование. 2012. №7. С. 88–96.

 8. Зима И. И., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Магнитные эффекты в воде и их влияние на теплофизические свойства // Вестник инженерной академии Украины.
2010. №3-4. С. 178-183.

9. Зима И. И., Богданов Г. Ф., Нечаев А. В. Роторная спектроскопия потоков больших энергий // Вестник Харьк. политехн. ун-та. 1999. Вып.75. С. 93–97.

10. Спосіб запобігання утворенню великодисперсної вологи у вологопаровому турбінному ступеню/ А. О Тарелін., В. П. Орловський, А. В Нечаєв. власник Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України. – № а 201512161; заявл. 08.12.2015; опубл. 12.12.15, Бюл. № 23. 5 с.

11. Нечаев А. В. Влияние электризованного влажнопарового потока на поверхностную прочность лопаток турбомашин // Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ-2019): матеріали міжнар. наук.-техн. конф., (Харків, 19 черв. 2019 р.). Х.: Харк. нац. ун-т імені В.Н. Каразіна, 2019. С. 51–52.

## **3MICT**

ΠΕΡ	ЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5		
BCT	УП	6		
PO3,	ДІЛ 1 ЕЛЕКТРИЗАЦІЯ ВОЛОГОЇ ПАРИ В КАНАЛАХ ЛОПАТКОВОГО			
АПА	РАТА ТУРБІНИ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА РОБОЧІ ЛОПАТКИ	11		
1.1 4	Реномен спонтанної електризації струменя вологої пари в каналах і соплах			
паро	вих машин	11		
1.2	Спонтанна електризація у вологопарових турбінах	13		
1.3	Супутні електризації пари явища, що здатні впливати на металеві			
пове	рхні робочих лопаток	24		
1.4	Зміна ерозійно-корозійних властивостей робочого тіла внаслідок			
елек	тризації	28		
1.5	Електризація вологої пари в турбіні і сучасні методи вирішення			
проб	блеми ерозійно-корозійних пошкоджень турбін	31		
1.6	Постановка задач дослідження на основі проведеного огляду	33		
1.7	Висновки по розділу 1	34		
2	ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІОНІЗОВАНОЇ ПАРИ ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО			
ПОЛ	ІЯ НА МІЦНІСНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНІ ЛОПАТКОВОЇ СТАЛІ	35		
2.1	Електрохімічна система в турбінних решітках обумовлена зарядженістю			
пото	потоку вологої пари і супутні ЕФЯ			
2.2	Вибір методу дослідження міцнісних властивостей поверхневого шару			
лопаткової сталі				
2.3	Експериментальна перевірка впливу контакту зарядженого дисперсного			
cepe;	довища на міцнісні властивості лопаткової сталі	39		
2.4	Експериментальне визначення ролі заряджених крапель води за умов дії			
паро	вим потоком на поверхню лопаткової сталі	53		
2.5	Дослідження дії високошвидкісного струменя електризованої вологої			
пари	на вміст водню в лопатковій сталі	59		

2.6	б Дослідження впливу пари з різною іонізацією на міцнісні властивості				
лопаткової сталі у вакуумованому стенді 77					
2.7	Висновки по розділу 2				
3	ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОСТІЙНОГО І ЗМІННОГО				
ЕЛЕІ	КТРИЧНИХ ПОЛІВ НА МІКРОТВЕРДІСТЬ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ				
ЛОПАТКОВОЇ СТАЛІ					
3.1	Експериментальна установка для дії електричним полем на зразок сталі	93			
3.2	Методика експерименту 96				
3.3	Результати експериментів				
3.4	Висновки до розділу 3	103			
4	УТОЧНЕННЯ ФІЗИЧНИХ УЯВЛЕНЬ ПОШКОДЖУВАНОСТІ				
ПОВ	ЕРХНІ ЛОПАТКОВОЇ СТАЛІ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЕФЯ	105			
4.1	Врахування електрофізичних явищ при розгляді ерозійного процесу	105			
4.2	Оціночний розрахунок поглинання водню ділянкою поверхні лопаткової				
сталі при наявності електричного заряду крапель 1					
4.3	Висновки по розділу 4	115			
5	ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ НЕГАТИВНОГО				
ВПЛ	ИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЯВИЩ В РОБОЧОМУ ТІЛІ НА ПОВЕРХНЕВИЙ				
ШАF	РОБОЧИХ ЛОПАТОК	118			
5.1	Фізичні передумови для розробки рекомендацій	118			
5.2	Випарний спосіб видалення вологи з каналів направляючого апарата				
вологопарового турбінного ступеня з урахуванням її електризації 119					
5.3	Метод зменшення зарядженості корекцією водно-хімічного режиму	122			
5.4	Використання системи нейтралізації зарядів в потоці	123			
5.5	Висновки по розділу 5	124			
ВИС	НОВКИ	125			
СПИ	СОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	127			
ДОДАТОК А Довідка про впровадження результатів кандидатської					
дисеј	ртації	.138			
дод	АТОК Б Список публікацій здобувача за темою дисертації	.139			

ДОДАТОК В Відомості п	ро апробацію ре	езультатів дисерта	aції141
	po unpoondito p		

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АСК автоматична система керування,
- ВХР водно-хімічний режим,
- ВЧ високочастотний,
- КВП контрольно-вимірювальні прилади,
- ККД коефіцієнт корисної дії,
- ПЕШ подвійний електричний шар,
- т.д. так далі,
- ТЕС теплова електростанція,
- ТЕЦ теплоелектроцентраль,
- ТЕН трубчастий електронагрівач,
- ЦНТ циліндр низького тиску,
- ЕРС електрорушійна сила,
- ЕМВ електромагнітні випромінювання,
- ЕФЯ електрофізичні явища.

#### вступ

Актуальність теми. Внаслідок досліджень вологопарових турбін, що проводяться останніми роками, було виявлено, що під час роботи турбіни складні газодинамічні і теплові процеси супроводжуються виникненням в потоці робочого тіла супутніх електрофізичних явищ. Уперше експериментальні дані щодо електризації вологої пари на натурній турбоустановці були отримані на турбіні Т-37/50-88 ТЕЦ-2 "Есхар" співробітниками ІПМаш НАН України під керівництвом А. О. Тареліна в 1998 році. Детальні дослідження електрофізичних явищ в турбінах показали, що вони здатні істотно впливати на робочі процеси в проточній частині низького тиску, в конденсаторі і в цілому на ефективність роботи турбоустановки. Першопричиною електрофізичних явищ (ЕФЯ) у паровому потоці є спонтанна електризація краплинної вологи, внаслідок чого з'являється об'ємний електричний заряд. Нині встановлено, що максимальна густина об'ємного електричного заряду концентрується за останнім ступенем і може досягати 10<sup>-3</sup> Кл/м<sup>3</sup> за напруженості поля близько 2×10<sup>5</sup> В/м. Об'ємний заряд формується зарядженими краплями, їх електризація залежить від розміру крапель, рН, хімічного складу робочого тіла, а також від матеріалів проточної частини і лопаток турбіни. Як правило, великі ерозійно-небезпечні краплі заряджені позитивно, а дрібні – негативно. Особливістю процесів електризації і нейтралізації крапель в паровому потоці є їх локалізація на поверхні контакту крапель і металу. Внаслідок цього поверхні робочих лопаток, що зазнають інтенсивних механічних навантажень, також зазнають і впливу ЕФЯ, у тому числі електричного поля об'ємного заряду пари, яке має постійну і змінні складові, обумовлені змінами в часі величини і значення об'ємного заряду. Дія такого роду може інтенсифікувати ерозійно-корозійне пошкодження робочих лопаток турбіни, що призведе до скорочення їх ресурсу і зниження ефективності роботи турбіни.

Таким чином, вивчення пошкоджувальної дії пари, що електризується, на міцнісні властивості робочих лопаток парових турбін і розробка методів їх захисту

від електрофізичних пошкоджувальних чинників є важливою науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є однією зі складових комплексу досліджень, проведених в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за бюджетними темами: "Розробка наукових основ нетрадиційних методів і засобів керування теплофізичними робочих властивостями середовищ теплових машин", № Д.Р.0297U001633; "Розробка теоретичних основ, методів і способів комплексного розв'язання задачі підвищення ефективності та надійності вихлопної частини енергетичних установок", № Д.Р.0197U012284; «Розробка наукових основ електрофізичних явищ в теплових енергетичних установках», № Д.Р.0100U004809; «Розробка методів підвищення ефективності тепломасообмінних процесів в енергетичних установках при впливі на робоче тіло електричних, магнітних і електромагнітних полів», № Д.Р. 0104U005621; «Розробка теоретичних основ і методів підвищення ефективності та надійності теплових установок за рахунок оптимізації параметрів активації режимних та робочих середовищ», № Д.Р.0109U001423; «Удосконалення методів оптимізації, контролю та управління термогазодинамічними та електрофізичними процесами, властивостями та якістю робочого тіла на різних стадіях технологічного циклу паротурбінних установок», № Д.Р. 0114U001436, де автор є виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи було встановлення закономірностей і фізичної природи впливу зарядженого парового потоку і супутніх ЕФЯ на міцнісні властивості поверхневого шару сталі лопатки.

Для досягнення мети були поставлені і розв'язані задачі:

1. Встановлення характеру і міри впливу електризованого потоку вологої пари на вміст водню і мікротвердість в досліджуваних матеріалах.

2. Дослідження впливу постійного і змінного електричного поля на мікротвердість лопаткової сталі при пластичній деформації.

3. Уточнення фізичної моделі механізму пошкоджуваності матеріалу з урахуванням отриманих експериментальних результатів. 4. Розробка рекомендацій з ерозійного і електрохімічного захисту з урахуванням отриманих експериментальних даних.

Об'єкт дослідження – міцнісні властивості поверхневого шару лопаткових сталей 20Х13 і 1Х11МФШ.

Предмет дослідження – вплив ЕФЯ в проточній частині вологопарових турбін на мікротвердість поверхневого шару лопаткових сталей.

Методи дослідження: експериментальне мікротвердості, визначення експериментальне дослідження ЕФЯ, фізичного моделювання, метоли комп'ютерного електричного обробки моделювання поля, математичної експериментальних результатів.

Експериментальні дослідження проводилися на спеціально розроблених стендах за допомогою універсальних електровимірювальних приладів. Обробка експериментальних даних проводилася в програмних пакетах Microsoft Excel, Elcut Student.

### Наукова новизна отриманих результатів:

- Уперше експериментально встановлено ефект істотного впливу зарядженого парового потоку на величину мікротвердості (понад 30 %) та на вміст водню в лопатковому матеріалі.
- Уперше експериментально досліджена залежність мікротвердості поверхневого шару лопаткового матеріалу від впливу постійного та змінного електричного поля.
- Запропоновано уточнену, таку, що раніше не розглядалась в теорії турбомашин, концепцію пошкоджуваності поверхневого шару лопаткової сталі краплями, яка враховує наявність електричного заряду ерозійно-небезпечних крапель і пов'язане з ним електричне поле.
- Теоретично обгрунтовано виявлене експериментально збільшення вмісту водню при дії потоку, що електризується.

### Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. На основі результатів дослідження запропоновано випарний спосіб запобігання утворенню ерозійно-небезпечної вологи у вологопарових турбінах, враховуючий електризацію крапельної вологи. Спосіб дозволяє суттєво зменшити витрати пари на видалення вологи за рахунок регулювання нагріву напрямних лопаток по сигналу електричного зонду, що визначає наявність крапель в потоці робочого тіла, і сигналу термопари який обмежує перегрів.

1. Запропоновано методи зниження негативного впливу електризації потоку на робочі лопатки турбіни шляхом раціонального вибору водно-хімічного режиму (ВХР), нейтралізації електричного заряду робочого тіла за останнім ступенем турбіни за допомогою спеціальної електродної системи; використання покриттів на соплових лопатках які знижують ефект електризації робочого тіла.

Методи зниження інтенсивності ЕФЯ в турбіні дозволяють істотно (в 2 рази) підвищити ресурс робочих лопаток. Результати дисертації можуть бути використані під час: проектування вологопарових турбінних ступенів; прогнозування ресурсу роботи робочих лопаток парових турбін; організації заходів щодо захисту лопаток від негативного впливу зарядженого парового потоку і ЕФЯ.

Особистий Опубліковані внесок здобувача. матеріали повністю відповідають змісту дисертаційної роботи. У роботах, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: в роботі [1] здобувач брав безпосередню участь в постановці завдання дослідження, розробці і виготовленні стенду, проведенні експеріментів, обробці експеріментальних даних; [2] робота здобувачем виконана самостійно; в роботі [3] здійснив огляд літератури і аналіз характеристик електромагнітного випромінювання що генерується електризованим потоком водного аерозолю; в [4] визначив робочий режим системи електризації пари на стенді; в [5] [6] [7] брав участь в розробці і виготовленні стенду, проведенні експеріментів, обробці експеріментальних даних; у роботі [8] виконав теоретичний аналіз можливості впливу електромагнітного випромінювання на теплофізічні властивості води; в роботі [9] брав участь в експериментальному дослідженню електромагнітного випромінювання робочого тіла натурної паротурбінної установки ТЕЦ-2 "Есхар" і обробці результатів; у [10] запропонував ідею контролю єрозійнонебезпечної вологи за допомогою електричного зонда; [11] написана здобувачем самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідалися і обговорювалися на: міжнародній науково-технічної конференції «Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ-2019)» (2019 р., м. Харків,); XVI міжнародній науковоконференції технічній «Удосконалювання енергоустановок методами математичного та фізичного моделювання» (2017 р., м. Харків); XII міжнародній науково-технічній конференції НТУ ХПІ «Енергетичні та теплотехнічні процеси і устаткування» (2016 р., м. Харків); XV міжнародній науковій конференції «Удосконалювання енергоустановок методами математичного фізичного та моделювання» (2015 р., с. Задонецьке, Зміївський р-н, Харківська обл.); IX міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення» (2013 р., м. Харків).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 11 наукових працях, з них 5 статей – у наукових фахових виданнях України (3 статті входять до наукометричних баз даних, 1 стаття в міжнародному журналі що індексується у базі Scopus), 1 патент України, 1 робота – матеріали міжнародної наукової конференції.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 153 сторінок, з них: 116 сторінок основного тексту, 92 рисунків, 21 таблиця, 107 найменувань використаних джерел на 11 сторінках.

### **РОЗДІЛ 1**

# ЕЛЕКТРИЗАЦІЯ ВОЛОГОЇ ПАРИ В КАНАЛАХ ЛОПАТКОВОГО АПАРАТА ТУРБІНИ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА РОБОЧІ ЛОПАТКИ (ОГЛЯД)

1.1 Феномен спонтанної електризації струменя вологої пари в каналах і соплах парових машин

Спонтанна електризація струменя вологої пари була виявлена в парових машинах на початку XIX століття в Англії. Вперше це явище спостерігали машиністи парової машини, що приводила в рух вагонетки на вугільній шахті Cramlington недалеко від Ньюкасла у вересні 1840 року [12]. Струмінь вологої пари, що витікав з парового котла в атмосферу, через нещільність фланцевого з'єднання на запобіжному клапані викликав відчутний електричний удар у разі дотику машиніста і довгі іскри електричного розряду. Інтенсивність електризації парового струменя залежала від тиску в котлі парової машини і погодних умов. Цей феномен викликав значний інтерес провідних англійських вчених, що спеціалізувалися в області електричних явищ. Експериментальні дослідження виявленого феномена були проведені М. Фарадеєм, В. Армстронгом, Паттінсоном та іншими дослідниками [13], [14], [15]. В експериментах, за допомогою зондів які вводилися в всередину парового котла, було виявлено, що, електризація в середині котла відсутня, а джерело електрики локалізоване в місці, де волога пара, рухається з тертям в каналі. Була досліджена залежність електризації від домішок у воді, тиску в паровому котлі, від матеріалу каналу, яким рухалась пара. Змінюючи матеріал каналу, можна було змінити навіть знак заряду парового струменя. В експериментах використовували сопла з діелектричними вставками з різних матеріалів. Приклад конструкції сопла Армстронга з лабіринтним каналом на рис. 1, на рис. 2 паровий електростатичний генератор Армстронга, з електризуючим пару соплом [12]. Корпус парового котла, встановленого на ізолятори, заряджався одним знаком електричного заряду, а колектор (металева гребінка) – іншим. Різниця потенціалів могла досягати десятків і більше кіловольт, за струму порядку одиниць мікроампер.



Рис. 1.1 Конструкція сопла Армстронга [12]



Рис. 1.2 Паровий електростатичний генератор: 1 – паровий котел; 2– сопловий апарат; 3 – потік вологої пари з об'ємним зарядом; 4 – колектор заряджених частинок; 5 – ізолятори [12]

Еквівалентну електричну схему процесу електризації в генераторі Армстронга можна зобразити наступним чином (рис. 1.3):



Рис. 1.3 Схема з позитивною електризацією пари та негативною електризацією соплового каналу

Для пояснення спостережуваних фактів Фарадей запропонував гіпотезу трибоелектричних пар: домішки на поверхні крапель дистильованої води і матеріал каналу утворюють трибоелектричні пари [13]. Знак заряду визначався взаємним станом речовин в трибоелектричному ряду. Фарадей склав трибоелектричний ряд, в якому попереднє тіло електризується позитивно, а наступне – негативно, однак ця точка зору не дозволяла пояснити ряд експериментів, зокрема знак заряду крапель в

струмені рідини, що розпилюється стисненим повітрям, проте дослідники відзначали певну схожість процесів електризації вологої пари, що містить крапельну вологу, і електризації під час розпилювання або розбризкування крапель води. Модель електризації крапель під час розпилення води (балоелектричний ефект), що грунтується на особливостях будови поверхні, запропонував у 1892 році Lennard [16]. Модель пояснювала знак заряду крапель не трибоелектричними явищами, а будовою поверхні диспергованої рідини. Однак ця модель була більш придатна для опису процесу розбризкування рідини, процеси ж, що відбуваються під час електризації потоку конденсовної вологої пари, значно складніші. Підводячи підсумки досліджень, проведених в кінці XIX століття, можна відмітити, що сталося первинне накопичення експериментальних фактів, а також виникли первинні наукові теорії, що пройшли суттєву еволюцію. Однак ні чисто хімічні, ні чисто фізичні моделі, запропоновані вченими, не дозволяли пояснити весь комплекс спостережуваних явищ під час електризації струменя вологої пари. Практичне застосування електризації пари в парових машинах намагалися реалізувати в ряді конструкцій парових електростатичних генераторів з великою кількістю сопел. У 1843 року гігантська машина з 46 форсунками була побудована для Лондонського політехнічного інституту, та подібна установка була експортована в США [17]. Парові генератори дозволяли отримувати високу напругу з іскровим розрядом в повітрі понад 50 см, але мали надзвичайно низький ККД (0,01%) і величезні розміри. Широкого поширення парові електричні генератори такого типу в подальшому не набули.

### 1.2 Спонтанна електризація у вологопарових турбінах

Спонтанна електризація виявила себе у вологопарових турбоустановках у началі XX століття, через дію електростатичними розрядами на обслуговуючий персонал, а також в зв'язку з аваріями і пошкодженнями турбоагрегатів 15 – 30 МВт [18]. Дослідження цього явища показали, що пошкодження виникають в наслідок дії паразитної електричної напруги на валах турбіни та генератора. У науково технічній літературі цього періоду [19], [20] висловлювалася думка, що однією з причин появи

паразитної електричної напруги на роторі турбіни є статична електризація ротора внаслідок тертя лопаток останніх ступенів об потік вологої пари. Таким чином наявність крапельної вологи в потоці робочого тіла під час його течії в решітках турбіни обумовлює процеси електризації подібні виникаючим в каналах і соплах, що були розглянуті в дослідженнях [13], [14], [15]. Як було показано в розділі 1.1 електризація струменя вологої водяної пари з крапельною вологою виникає за його протікання через сопловий канал. Конструктивні особливості проточної частини ЦНТ вологопарової турбіни створюють подібні умови для такого процесу. Якісно механізм електризації парового потоку в каналах лопаткового апарата можна подати таким чином. В результаті розширення і охолодження потоку пари в турбіні за зоною Вільсона утворюється крапельна волога у вигляді крапель і плівок. Краплі, б'ючись об лопатки, або відскакують, або руйнуються, створюючи вторинні дрібні краплі і рідкі плівки на поверхні направляючих лопаток, які вдруге диспергуються потоком пари. При цьому відбувається електризація крапель внаслідок руйнування подвійного електричного шару поверхні диспергованої рідини (балоелектричний ефект) [21]. Балоелектричний ефект спостерігається тільки у полярних рідин, до яких належить вода, дипольний момент молекули води дорівнює 1,84D [22]. Рухаючись проточною частиною, паровий потік послідовно проходить соплові та робочі решітки турбіни, при цьому слід врахувати, що соплові лопатки закріплені нерухомо в корпусі проточної частини і заземлені, а робочі лопатки закріплені на роторі та ізольовані від землі масляною плівкою підшипникових вузлів ротора. Внаслідок ударів заряджених крапель по ротору на ньому поступово накопичується електричний заряд, з потенціалом, що є достатнім для пробою масляної плівки підшипникових вузлів або інших діелектричних ділянок між ротором і оточуючими його заземленими елементами, а після розряду процес заряджання повториться знову. Крапельна волога, після взаємодії з лопатками, поступово накопичує об'ємний заряд, густина якого буде найбільша на виході з турбіни, а частина об'ємного заряду буде обумовлена ерозійними процесами. Процес утворення об'ємного заряду вологопарового потоку зображено на рис. 1.4. Таким чином, під

час роботи вологопарової турбіни на роторі буде присутнім пульсуючий електричний потенціал до сотень вольт.

Приклад осцилограми пульсуючої уніполярної електростатичної напруги, що наводиться на роторі турбіни 12,5 кВт наведено на рис. 1.5 [23]. Інтенсивність електризації буде залежати від режиму вологості, роботи турбіни, хімічного складу робочого тіла. Крім того, на електризацію впливатиме вид матеріалів, з яких виготовлений лопатковий апарат турбіни.

Подальше вивчення електризації ротора турбіни привело до появи моделей електризації двох напрямів «електромеханічного» і



Рис. 1.4 Схема електризації вологої пари в решітках турбіни

«тепломеханічного» [24]. Електромеханічний напрям об'єднує гіпотези, пов'язані з



Рис. 1.5 Осцилограма електростатичної напруги на роторі турбіни [23]

механізмом електромагнітної індукції, шо виникає в елементах турбоустановки. У тепломеханічному напрямі гіпотези будуються на особливостей вивченні статичної електризації під час тертя пари об поверхню проточної частини і деталі турбіни. За реальних умов на турбіні спостерігається складний комплекс фізичних явищ і електромеханічного, і тепломеханічного роду [18], [25], а

також на електризацію ротора впливають хімічні домішки у воді, індукція зарядів в краплях, обумовлена дією зовнішніх фізичних полів та інші фактори. Ще одним

електризації ускладнюється наявністю електричних і магнітних полів в проточній частині та електричним потенціалом поверхні робочих лопаток. Електризація металевого тіла в потоці крапель являє собою складний процес, в якому величина і знак заряду залежать від швидкості обтікання потоку, кількості крапельної вологи в потоці, виду металу, потенціалу тіла. Детальне вивчення електризації металевих тіл в аеродинамічній трубі в потоці водного аерозолю проводилося в ряді досліджень [26], [27]. Було виявлено, що заряджання ізольованого металевого тіла за рахунок диспергування вологої плівки з його поверхні на порядок менше, ніж потоком крапель. За низьких швидкостей обтікання (35 – 40 м/с) електризація різних металів протікає приблизно однаково. Зі збільшенням швидкості потоку для різних металів проявляються істотні відмінності. Інтенсивність заряджання і навіть його знак залежать від виду металу і водності потоку аерозолю. Розрахована за результатами експериментів продуктивність механізму заряджання потоком водяних крапель (10<sup>-4</sup> – 10<sup>-5</sup> Кл/кг) виявилася на кілька порядків більше досліджених раніше механізмів електризації, пов'язаних з розбризкуванням води без накладення зовнішнього електричного поля. Одні метали заряджаються позитивно, інші – негативно, на цій підставі в роботі [26] був зроблений висновок щодо можливості розробки покриттів, що різко знижують інтенсивність електризації. В обговоренні механізму електризації металевого тіла в [28] автор розглядає його як комплекс декількох процесів: ударну поляризацію крапель води, контактну електризацію зарядженими краплями, електризацію струмом виносу дифузійної частини ПЕШ за ударного руйнування крапель, електризацію внаслідок процесу екзоелектронної емісії. Важливо відзначити, що екзоелектронна емісія, внаслідок її природи, є результатом ерозії металевої поверхні [29], відповідно частина заряду металевого тіла обумовлена ерозійними процесами.

З моменту виявлення феномена електризації в парових турбінах дослідження цього явища були сфокусовані головним чином на потенціалі ротора, але в середині ХХ століття з'явилися публікації, в яких зверталася увага не тільки на заряд ротора,

а й на спонтанну електризацію парового потоку в турбіні. Так, у 1980 році була опублікована [30] робота присвячена комплексному експериментальному дослідженню електростатичних явищ, пов'язаних з течією потоку вологої пари у вологопарових турбінах. Дослідження проводилися на експериментальному стенді у вологопаровому каналі, вивчалися процеси випаровування, конденсації, відносні швидкості фаз, розрив межі рідина-пара, утворення крапель. Зарядка пари проводилася потоком сухої пари з первинним та вторинним розпиленням рідкої плівки. Результати дослідження показали, що електризація залежить від параметрів пари, вакууму в конденсаторі, а наявність позитивного потенціалу на валу турбіни свідчить про активну ерозію лопаток. На думку авторів, електризація вологої пари виникає в основному через удар крапель об перешкоду і подальше диспергування рідини на дрібні краплі, які стають зарядженими, а також від раптового відриву плівки рідини від поверхні твердого тіла. При цьому відсутня електризація сухої пари, а забруднення поверхні проточного каналу і домішки у вологій парі змінюють полярність його заряду. У статті не робиться спроба пов'язати електростатичні заряди в потоці пари з характеристиками турбіни, тому що їхній вплив на ефективність робочих процесів, на думку авторів, необхідно досліджувати окремо. Передбачається, що електричні заряди незначно погіршують продуктивність роботи турбіни, але можуть істотно впливати на ерозію лопаток. У статті вказується на необхідність подальшого комплексного вивчення впливу електризації вологої пари на турбіну з метою поліпшення конструкцій підшипникових вузлів та збільшення робочого ресурсу ротора та лопаток турбіни.

Ще однією роботою, в якій досліджено вплив електростатічного заряду на течію і конденсацію вологої пари в каналі парового стенду, що імітує фрагмент решітки робочих лопаток, є дисертація Ј. Buckley [31]. У даній роботі проводилося вивчення спонтанної електризації ультрачистої пари і пари з добавкою аміаку, а також визначався об'ємний заряд потоку пари. Джерелом появи зарядів було визначено розпорошення рідких плівок, а однозначного впливу рН на зарядоутворення автор не виявив.

Вперше сучасне системне вивчення електризації вологої пари в реальній паровій турбіні було проведено в 1992 році фахівцями ІПМаш НАН України на турбіні потужністю 50 МВт [32]. Дослідження проводилося зондовим методом, була розроблена методика та оригінальна конструкція зонда [33], [34] для вимірювання об'ємної густина зарядів в потоці робочого тіла. Встановлюючи стаціонарні зонди в різних місцях вихлопного патрубка і безпосередньо за останнім робочим колесом турбіни, була визначена густина зарядів в паровому потоці вихлопної частини турбіни на різних режимах. Залежно від режиму роботи турбіни густина зарядів змінювалася в межах  $4 \cdot 10^{-7} \div 10^{-4}$  Кл/м<sup>3</sup>, а максимальна напруженість електричного поля за останнім ступенем досягала ~2·10<sup>5</sup> В/м. Головним результатом цієї роботи є отримані в натурних умовах експериментальні дані щодо наявності значного об'ємного позитивного електричного заряду в потоці пари у вихлопній частині турбіни та електричного поля високої напруженості. Ці характеристики робочого тіла у вихлопній частині турбіни (останній ступінь + патрубок) раніше ніколи не враховувалися ні за фізичного моделювання процесів в ЦНТ, ні в конструкторських розробках.

Надалі авторами дослідження були проведені роботи з визначення електризації в зоні фазового переходу, на експериментальній турбіні ЕТ-12 (МЕІ, м. Москва) потужністю 750 кВт, які показали, що густина об'ємного заряду становить  $10^{-10} \div 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup> [35]. Отримані дані дозволили оцінити кінетику процесу електризації в ЦНТ і зв'язати її зі збільшенням розміру крапель – в області великодисперсної вологи спостерігається і найбільша густина об'ємного заряду. Також було виявлено, що в потоці пари великі краплі, як правило, заряджені позитивно, а дрібні – негативно. На рис. 1.6 показано розподіл об'ємного електризації робочого тіла на різних режимах роботи були проведені на турбіні T-250/300-240 (ТЕЦ-5 м. Харків), що дозволило краще зрозуміти причину появи в паровому потоці зарядів різного знака [33]. Оскільки електризація парового потоку залежить від його хімічного складу [13], фахівцями ІПМаш НАН України були проведені дослідження з визначення характеристик електризації робочого тіла за різних водно-хімічних режимів турбін на ряді ТЕС і ТЕЦ України, США та Росії [36].



Рис. 1.6 Об'емний заряд у останніх ступенях турбіни

Наприклад, під час експерименту в 1998 р на турбіні потужністю 800 МВт станції "Navajo" («Навахо» штат Арізона, США), підготовленого та проведеного українськими (ІПМаш НАН України) та американськими (Sonoma Research Company USA) фахівцями [37], була виміряна густина об'ємного заряду в останніх ступенях турбіни і отримано розподіл густини заряду в паровому потоці в радіальному напрямку в залежності від рН живильної води (рис. 1.7). Максимальне значення густини заряду склало  $10^{-4}$  Кл/м<sup>3</sup>. Як видно з рисунку, зміна рН робочого тіла істотно впливає на процеси електризації: змінюються розміри області розподілу зарядів, інтенсивність електризації та її полярність.



Рис. 1.7 Залежність густини об'ємного заряду від положення щодо довжини лопатки і pH живильної води [37]

Наведена на рисунку виміряна зондом густина заряду в потоці пари дозволяє побудувати діаграму розподілу іонних струмів в потоці пари і електричних струмів на поверхнях лопаток за pH = 9,3 (рис. 1.8). В даному випадку область роззподілу зарядів охоплює майже всю поверхню робочої лопатки по висоті, полярність заряджених крапель, що зриваються з лопаток, уніполярна позитивна.



Рис. 1.8 Схема електричних струмів за статичної електризації пари в турбіні за рН 9,3 [37]



Зниження рН до 8,6 (рис.1.9) істотно знижує і інтенсивність електризації, сумарний струм заземлення ротора, при цьому електризація стає різнополярною. Очевидно, що в випадку цьому струм електризації частково замикається на поверхні лопатки і струм ротора не є повним електризації. У струмом першому випадку (pH 9,3) пов'язана електризація 3

Рис. 1.9 Схема електричних процесів статичної електризації пари в турбіні за рН 8,6 [37]

перенесенням позитивних іонів і, як наслідок, іонний струм, який стікає на поверхні за направляючою лопаткою, може викликати наводнювання (оскільки робочим тілом є середовище, що містить протони). У другому випадку (pH 8,6) на поверхні лопаток виникають ділянки з різнополярною електризацією, які можуть бути осередками електрохімічних процесів. На даний час в ІПМаш тривають дослідження електризації пари та впливу ЕФЯ у вологопарових турбінах на їх надійність і ефективність [38 - 44].

Порівняльний аналіз спонтанної електризації крапель в турбінах на атомній електростанції і на електростанції на викопному паливі було подано в 2001 році на 14-й міжнародній конференції в Кіото [45]. Дослідження проводились зондовим методом, автори використовували комбінований зонд з оптичним і електричним каналами. В роботі вивчався взаємозв'язок розмірів крапель з їх електричним зарядом на атомній турбіні 1000 МВт і турбіні 210 МВт на вуглеводневому паливі. Були отримані спектри розміру крапель атомної і теплової турбін за останнім ступенем на рівні середини довжини лопатки (рис. 1.10). З графіків видно, що в атомній турбіні спектр крапель істотно ширше, а основна частина крапель крупніше,

ніж у тепловій турбіні. Також було визначено розподіл вологи по довжині лопатки для кожної з турбін (рис. 1.11).



Рис. 1.10 Спектр розмірів крапель за останнім ступенем турбіни для AEC і TEC: φ<sub>1</sub> (D) – функция плотности вероятности; D (мкм) – діаметр крапель [45].



Рис. 1.11 Розподіл вологи в турбінах по висоті лопатки: z – висота лопатки; y1 – відносна вологість [45]

Робочі параметри турбін під час вимірювань наведені в табл. 1.1 [45].

Параметри	ТЕС 210 МВт	AEC 1000 MBT
Довжина робочих лопаток, мм	840	1085
Тиск на вході ЦНД, кПа	131	690
Температура на вході ЦНД, <sup>0</sup> С	181	248,5
Тиск на виході ЦНД, кПа	4,8	6,2
Потужність турбіни, <sup>0</sup> С	200	1004
Середній тиск у зоні Вильсона, кПа	23,1	142,3
BXP	Аміачний, pH=8,8÷9	Аміачний, pH=9,8÷9,9

Таблиця 1.1 Параметри, за яких проводилися вимірювання на турбінах

В результаті дослідження було виявлено, що дрібні краплі заряджені негативно, а великі – позитивно, що цілком узгоджується з даними

експериментальних досліджень, отриманих в ІПМаш НАН України. В атомній турбіні густина об'ємного заряду значно вища, ніж в тепловій, при цьому рН конденсату пари в атомній турбіні також більше ніж на ТЕЦ. Значення відносної



Рис. 1.12 Розподіл відносного заряду крапель q<sub>1</sub>/е (виражене через елементарний заряд) і питомої густини заряду σ<sub>1</sub> дрібних крапель по висоті лопатки атомної станції [45]

величини заряду дрібних крапель  $q_1$  і густини заряду  $\sigma_1$  уздовж висоти лопатки турбіни атомної станції 1000 МВт зображено на рис. 1.12.

Подібним чином виглядає i зарядженості розподіл потоку великих крапель уздовж висоти лопатки. З представлених в статті найбільша даних видно, ЩО зарядженість потоку пари, обумовлена як великими, так і дрібними краплями, збігається з

областю найбільшої вологості по висоті лопатки турбіни в діапазоні 600 ÷ 800 мм як для турбіни атомної станції так і для турбіни теплової станції. З урахуванням різнополярності великих і дрібних крапель, в цій області лопатки знаходиться ділянка різнополярної електризації, подібна зображеній на рис. 1.8. Отримані авторами [45] результати показують, що для турбін, на яких проводились дослідження, найбільш зарядженим був вологопаровий потік пара в атомній станції. Щільність зарядів на одиницю маси дрібних крапель в атомній турбіні була приблизно в 3,7 рази більше, ніж великих (зарядженість переважно негативна). У турбіні теплової станції щільність позитивних зарядів в потоці великих крапель приблизно в чотири рази менше, ніж зарядів в потоці негативних крапель, ВХР був аміачний з рН 8,8 ÷ 9. Відповідно повний виміряний об'ємний заряд потоку пари в даній турбіні також переважно негативний і приблизно на порядок менше, ніж в атомній. 1.3 Супутні електризації пари явища, що здатні впливати на металеві поверхні робочих лопаток

Електромагнітні випромінюваня у вихлопній частині парової турбіни, обумовлені електризацією робочого тіла. Як відомо, виникнення ЕМВ обумовлено прискореним рухом заряджених частинок, що створює поле випромінювання, пропорційне прискоренню [46]:

$$P_r = \frac{Q^2}{6\pi} \cdot \frac{1}{\varepsilon_0 c^3} a^2, \tag{1.1}$$

де *P<sub>r</sub>* – потужність випромінювання;

Q – заряд частинки, Кл;

а – прискорення частинки, м/с<sup>2</sup>;

с – швідкість світла, м/с;

ε<sub>0</sub> – діелектрична стала.

Прискоренний рух заряджених частинок в потоці робочого тіла відбувається в процесах прискорення, злиття і диспергування заряджених крапель, а також в електричних розрядах з їх поверхні. Крім того електричні розряди можуть відбуватися між електризованим потоком пари і заземленними поверхнями, якщо напруженість електричного поля перевищить пробивне значення [47], [48].

Вперше ЕМВ в турбоустановці були експериментально зареєстровані науковими співробітниками ШМаш НАН України на початку 1990-х років у вихлопному патрубку вологопарової турбіни Т-37/50-8,8 [32]. Прийом випромінювання здійснювався за допомогою лінійних антен, підвішених над трубним пучком. Вимірювання спектрального складу випромінювання проводилися аналізатором спектру С4-59 з діапазоном вимірювань 0,01 ÷ 110 МГц і С4-27 з діапазоном вимірювань 0,01 ÷ 40 ГГц. Загальний вигляд відносного розподілу сигналу по спектру наведений на рис. 1.13. В результаті експерименту були виявлено низькочастотні складові ЕМВ з найбільшими амплітудами на частотах близько 5, 15 і 25 кГц і високочастотне випромінювання ~2 ГГц.


Рис. 1.13 Загальний вигляд розподілу амплітуди сигналу низькочастотної частини спектра випромінювання [32]

Крім EMB, обумовленого прискореним заряджених рухом вода робоче тіло частинок, як вологопарової турбоустановки може випромінювати електромагнітну енергію, пов'язану хвильову 3 прецесією магнітного моменту атомів водню, що отримала назву [49]. роторних ХВИЛЬ вимірювання Експериментальні роторних випромінювань на ТЕЦ-2

«Есхар» показали, що робоче тіло вологопарових турбоустановок є потужним джерелом шумових електромагнітних сигналів, що становлять інтерес з точки зору дистанційного контролю стану агрегату, робочого тіла і екологічної обстановки [50]. Результати експериментальних вимірювань спектральної густини потужності роторних випромінювань в діапазоні гіромагнітних частот протонів наведені на рис. 1.14. Експерименти проводилися за особистої участі автора.



Рис. 1.14 Розподіл потужності випромінювання робочого тіла в вихідному патрубку турбіни ВК-50-2 ЛМЗ за різних навантажень: 1 – 10 МВт; 2 – 40 МВт [50]

Вода здатна генерувати електромагнітні і роторні випромінювання завдяки резонансним магнітним властивостям [51] і завдяки цьому існує можливість впливати на теплофізичні та фізико-хімічні властивості води за допомогою магнітних і електромагнітних полів [8], [52 – 54]. Зокрема, в роботі [52] розглядається можливість збудження молекул води з переходом їх в стан предисоціації. Наслідком цього може бути збільшення кількості активних іонів водню в краплях під час удару об поверхні проточної частини турбіни, що може посилювати наводнювання металу.

Електрофізичні процеси та електромагнітні випромінювання, що виникають в проточній частині турбіни [3], в разі достатньої інтенсивності можуть пошкоджувати діелектричні матеріали, що встановлюються, наприклад, у вихлопному патрубку і в конденсаторі турбіни, зокрема такі, як електричні кабелі, допоміжна арматура, датчики КВП і т. п., а також чинити електричний та магнітний вплив на поверхні конструкційних матеріалів проточної частини, що позначається на ерозійних, корозійних та електрохімічних процесах.

Вплив електричного поля і потенціалу ротора на міцнісні властивості поверхневого шару робочих лопаток. Як було відзначено в [33], під час електризації парового потоку виникає електричне поле об'ємного заряду, найбільша виміряна напруженість якого складала  $\sim 2 \times 10^5$  В/м. Поле об'ємного заряду впливає на робочі лопатки останнього ступеня, а також на вологу на їх поверхнях. Крім того ротор турбіни і відповідно робочі лопатки знаходяться під невеликим електричним потенціалом [23], [25].

З проведених останніми роками досліджень відомо, що під впливом електричного поля механічні характеристики поверхневого шару деяких металів можуть зазнавати суттєвих змін. Так, наприклад, дослідження мікротвердості зразків цинку, алюмінію та інших матеріалів показали, що наявність електричного потенціалу на зразку за пластичної деформації його поверхневого шару здатна змінювати мікротвердість більш ніж на 10 % [55 – 58]. Спосіб подачі електричного

потенціалу на зразок цинку, що зазнає пластичної деформації, [55] наведено на рис. 1.15.



Рис. 1.15 Схема подачі потенціалу на поверхню зразка 1 – зразок; 2,4 – мідні обкладки; 3 – ізолюючий шар; 5 – індентор; 6 – джерело постійної напруги [55]

Експериментальна залежність мікротвердості поверхневого шару цинку від потенціалу на його поверхні наведена рис. 1.15. У [59] наводяться дані щодо впливу електромагнітних полів і електричних струмів на повзучість, пластичну деформацію, твердість.



Рис. 1.16 Залежність мікротвердості площини (0001) монокристалу цинку від потенціалу на поверхні [55]

Електричне поле, що виникає в наслідок електризації робочого тіла має постійну і змінну складові, причому змінна обумовлена взаємним рухом об'ємного заряду і деталей турбіни. Частота змінних складових електричного поля буде кратна частоті обертання ротора турбіни і кількості міжлопаткових каналів робочих лопаток в ступені.

Очевидно, що в разі електризації робочого тіла ерозійно-небезпечну

крапельно-ударну дію вологи на лопатки останніх ступенів необхідно розглядати з урахуванням наведених вище даних.

1.4 Зміна ерозійно-корозійних властивостей робочого тіла внаслідок електризації

Наявність заряду крапель і електрофізичні явища при взаємодії крапель з лопатками турбіни є маловивченим аспектом проблеми негативного впливу рідкої фази на деталі проточної частини. Аналізу механоелектрохімічних процесів і явищ, що виникають при дії електрізованого потоку робочого тіла на лопатки турбіни і раніше не враховувалися в теорії і практиці, присвячена робота [7]. У роботі відзначено, що математичні моделі, які використовуються в сучасних програмних продуктах, дозволяють з прийнятною для практики точністю оцінювати вірогідність ерозійного зносу турбінних лопаток, однак вони не відображають повною мірою фізичні особливості всіх явищ, супутніх формуванню рельєфу ерозійної поверхні. Це відноситься перш за все до процесів ударно-вибухового руйнування крапель [33] та диспергуванню плівок вологи, які супроводжуються комплексом електро-фізикохімічних явищ, в результаті яких краплі парокрапельного потоку електризуються, набуваючи заряд величина і полярність якого залежить від режиму роботи турбіни, ВХР і виду конструкційних матеріалів з якими взаємодіє волога. Процес виникненням електризації супроводжується електромагнітних полів i випромінювань в широкому діапазоні частот, які можуть сприяти як локальному ВЧ розігріву матеріалів (скін-ефект) так і виникненню об'ємних розрядних процесів (коронний, тліючий, іскровий або дуговий розряди). У проточній частини парової турбіни виникають імпульсні електричні струми, які призводять до наводнення катодних і травленню анодних ділянок поверхонь деталей. Крім того, вони можуть сприяти локальній пластифікації металів за рахунок прояву електронно-пластичного ефекту, підвищуючи ймовірність корозійно-ерозійного руйнування конструкційних матеріалів. Формування ерозійного рельєфу робочих лопаток останніх ступенів складається з комплексу паралельно-послідовних взаємно обумовлених механічних і електрохімічних процесів. При цьому інтегральний характер і інтенсивність ерозійного руйнування лопаткового матеріалу багато в чому залежить від прояву адсорбційно-пластифицируючого ефекту, обумовленого наводненням і корозійними явищами. У роботі [60] присвяченій прогнозуванню і моделюванню ерозійного руйнування поверхні лопаток відзначається, що електрофізичний фактор, якій раніше не враховувався, може відігравати важливе значення для уточнення моделі фізичного механізму руйнування при подальшому розвитку теорії ерозійного руйнування. У монографії [33] розглядається проблема впливу ЕФЯ на ерозійнокорозійне руйнування елементів турбомашин. Представлені електрофізичні аспекти кінематики ударної взаємодії крапель з твердою поверхнею і електризацією крапель при руйнуванні, а також пов'язані з ними електрохімічні ефекти. Показано, що наслідком виникнення ЕФЯ в робочому тілі є зміна його ерозійно-корозійних властивостей. Зокрема інтенсифікуються електрохімічні процеси на поверхні металевих деталей турбіни, що викликає наводнення металу. Як приклад наведено експериментальні дані по дослідженню вмісту водню в зразках, встановлених на ерозіїному стенді і вилежаних в сухому повітрі після випробувань протягом не менше 3 місяців. Випробуванням піддавали плоскі зразки з розмірами 5x20x30 мм, виготовлені зі сталі 15Х11МФ в стані поставки; зразки з ніобій-вуглецевим покриттям; зразки із стелітовою вставкою. Еродовані ділянки плоских зразків механічно розрізали на кілька різних частин, зважували, а потім методом плавки в несучому газі на установці ПТАКОО1 в них визначався вміст водню. Подібним чином досліджувався вміст водню в дроті діаметром 2 мм зі сталі Х18Н9Т, використаному для бандажного кріплення деталей системи електрофізичної дії, встановленої в патрубку турбоустановки Т-37/50-8,8 ТЕЦ «Есхар», під час проведення натурних дослідів. Зразок з дроту перебував в умовах дії позитивно зарядженого вологопарового потоку в патрубку протягом 18 днів, після чого дріт став крихким і руйнувався від незначних деформацій.

З наведених в таблиці 1.2 результатів видно, що ділянки поверхні металів які зазнають ерозійного зносу під час ударної дії крапель води, суттєво наводнюються (в деяких випадках концентрація водню зростає більш ніж в десять разів). Залишкова наводненість зберігається протягом тривалого часу, вміст водню в зразках навіть після вилежування в 3 – 10 разів вище, ніж в початковому стані. Аналогічні результати отримані і для бандажного дроту. На підставі отриманих

результатів зроблено висновок, що ударна дія крапель води на металеву поверхню призводить до виникнення трибохімічних і електролітичних процесів, в результаті яких металева поверхня значно насичується воднем, а електрофізичні явища в проточній частині можуть посилювати цей ефект.

H		Номер	зразка	Контрольний			
Параметр	1	2	3	4	зразок	Примітка	
		15X11M¢	Þ + покри	гтя ніобій·	вуглець		
Маса зразка, г	2,940	3,920	5,320	7,360	3,740		
Концентр. водню (С <sub>H2</sub> ), ppm	7,8	4,35	5,37	4,04	1,96		
15X11MФ + у стані постачання							
Маса зразка, г	2,730	2,560	2,150	7,290	5,180		
Концентр. водню (С <sub>н2</sub> ), ppm	5,31	7,91	4,52	2,92	1,15		
		Сте	аллітова во	ставка + 40	)A		
Маса зразка, г	8,580*	7,570**	5,320	7,360	1,89	*- стелітова. вставка **- основний метал	
Концентр. водню (С <sub>H2</sub> ), ppm	6,418	29,6	5,37	4,04	2,52		
Дріт Х18Н9Т							
Маса зразка, г	1,130	1,58			1,89		
Концентрація водню (С <sub>н2</sub> ), ppm	25,62	31,54			2,52		

Таблиця 1.2 Зміст водню в зразках після ударної дії крапель води [33]

На ймовірність участі активного водню у процесах крапельно-ударної ерозії звертається увага в публікації [61]. Автори статті експериментально виявили ефект газової емісії із сталевих зразків після випробувань на ерозійному стенді, який пов'язують з наводненням металу. Також ідея участі активного водню в процесі

краплеударної ерозії розглядається в роботі [62] як наукова гіпотеза, що потребує більш глибокої перевірки.

1.5 Електризація вологої пари в турбіні і сучасні методи вирішення проблеми ерозійно-корозійних пошкоджень турбін

Наведені вище дані показують, що електризація робочого тіла вологопарових турбін пов'язана з наявністю в ньому крапель рідини, причому більші за розміром ерозійно-небезпечні краплі мають і більший електричний заряд. Через це за наявності електричного заряду в потоці робочого тіла необхідно в першу чергу звернути увагу на особливості краплеударної дії заряджених крапель. Як відомо, саме краплеударна дія є основною причиною ерозійного пошкодження лопаток останніх ступенів вологопарових турбін. Сучасні методи боротьби з ерозійнокорозійною пошкодженістю діляться на активні і пасивні. Активні методи грунтуються на зниженні вологості і зменшенні розмірів рідких частинок двофазного потоку в останніх ступенях турбін, усуваючи основну причину ерозійного зносу. Пасивні способи боротьби в першу чергу спрямовані на поліпшення властивостей поверхневих шарів (зміцнення) і створення різного роду зносостійких покриттів. До цієї ж групи відносять конструкторсько-технологічні заходи, які за рахунок оптимального вибору конструкційних матеріалів з урахуванням ïχ ерозійної стійкості, поліпшення структури традиційних конструкційних матеріалів ефективних та використання проектних конструкторських і технологічних рішень забезпечують підвищення ерозійної стійкості елементів проточних частин, що експлуатуються В умовах високошвидкісного впливу двофазного потоку. Основні активні методи: зменшення маси ерозійно-небезпечної вологи, сепарація вологи перед ЦНТ, периферійне вологовидалення в зазорах, периферійне видалення вологи в діафрагмах, сепарація вологи робочими лопатками. внутрішньоканальна сепарація, випарне вологовидалення, використання ступеня великодисперсної вологи, зменшення швидкості зіткнення. Основні пасивні методи: зміцнення металу лопаток, накладки і напайки твердих сплавів, електроіскрове зміцнення, електролітичне хромування,

захисні покриття, зміна конструкції вхідної кромки робочих лопаток. Докладний огляд сучасного стану пасивних і активних методів захисту наведено в ряді наукових публікацій провідних фахівців Фаддєєва [63], Перельмана [64], Пряхіна [65], Шубенка [66], [67], Ковальського [68], [69], Качурінера [70]. Як зазначено в [70], ерозія деталей і, перш за все, робочих лопаток останніх ступенів конденсаційних і теплофікаційних турбін продовжує залишатися однією з важливих проблем. Ерозійний знос лопаток не тільки знижує надійність, але і збільшує втрати енергії в лопатках та змінює їх вібраційні характеристики, що може призводити до аварій, тому заводи-виробники встановлюють обмеження на граничні величини ерозійного зносу. На цей час процеси ерозійно-корозійного зносу вивчені недостатньо. Це стосується і корозійних процесів, їх залежності від рН для різних лопаткових матеріалів, і електрохімічних процесів при голчастому еродуванні поверхні. Недостатньо вивчено вплив розмірів крапель на ерозію лопаток. Також у роботі [70] відзначено, що сьогодні немає однозначної відповіді щодо значущості тих ЧИ інших механізмів краплеударної ерозії. Так, наприклад, голчаста (конусоподібна) форма еродованої поверхні може бути пояснена і зміною кута зіткнення краплі з поверхнею і більш високим негативним потенціалом ділянок поверхні високої кривизни (особливо на вершинах голок), і особливостями кристалічної структури металу. Наймовірніше при цьому проявляється вплив усіх зазначених механізмів.

Дискусійними є питання щодо: наявності порогової швидкості, нижче якої ерозія не починається; визначальної властивості матеріалів; ролі корозійних та електрохімічних процесів; впливу кута падіння краплі на поверхню та низки інших питань.

Однак ні в одній з розглянутих робіт з методів захисту від ерозійнокорозійного зносу не враховуються ні електризація крапельної вологи в робочому тілі, ні електрофізичні явища, що супроводжують електризацію вологої пари в проточній частині парових турбін.

## 1.6 Постановка задач дослідження на основі проведеного огляду

Наведені вище дані дають підставу вважати, що робота різноманітних вологопарових турбін, як правило, супроводжується як спонтанною електризацією вологої пари, так і електризацією крапельної вологи в умовах впливу електричного поля. При цьому поверхні проточної частини, і в першу чергу лопатки турбіни опиняються під дією ударів заряджених крапель та супутніх ЕФЯ.

Метою роботи є встановлення закономірностей і фізичної природи впливу зарядженого парового потоку і супутніх ЕФЯ на міцнісні властивості поверхневого шару лопаткової сталі.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- розробити, виготовити та змонтувати стенд для дослідження впливу вологопарового потоку з електричним зарядом різних параметрів на лопаткові матеріали;
- експериментально визначити вплив на міцнісні властивості поверхневого шару лопаткової сталі зарядженого потоку вологої пари за різних швидкостей течії і різних умовах контакту пари та поверхні металу;
- експериментально визначити вплив іонізованої та нейтральної пари на концентрацію водню в зразках лопаткової сталі;
- експериментально встановити ступінь впливу постійного і змінного електричних полів на міцнісні властивості поверхневого шару лопаткової сталі;
- розробити якісну фізичну модель впливу електризованого парового потоку з урахуванням впливу ЕФЯ на механічні властивості поверхні робочих лопаток останнього ступеня;
- розробити заходи щодо захисту робочих лопаток турбіни від впливу електризованої пари і ЕФЯ.

Складність фізичних явищ під час електризації і дії електризованої вологої пари на робочі лопатки обумовлює вибір як основного експериментального методу дослідження.

1.7 Висновки по розділу 1

Електризація потоку вологої пари в турбіні являє собою складну систему механічних, електричних, електрохімічних, теплових, електромагнітних явищ [7]. На цей час відсутній повний теоретичний опис такої системи з огляду на її надзвичайну складність. Важливу роль в комплексі ЕФЯ відіграє високошвидкісне зіткнення з поверхнями проточної частини і руйнування крапель. При цьому слід враховувати і різницю зарядів крапель за знаком: на поверхню металу потрапляють як великі позитивно заряджені, так і дрібні негативно заряджені краплі, що також сприяє посиленню електрохімічних процесів на поверхні металу. Додатковий вплив на поверхню чинять електричні і магнітні поля [8] і струми, а також ЕМВ [2], [9].

В цілому на підставі викладених вище даних, очевидно, що наявність електричного заряду крапель в потоці робочого тіла, об'ємного заряду потоку, супутніх електричних і магнітних полів і струмів істотно змінює властивості робочого тіла як ерозійно-корозійного функціонального середовища, що чинить вплив на металеві поверхні деталей проточної частини, в тому числі на міцнісні властивості поверхні робочих лопаток турбін. Однак дотепер спеціального дослідження впливу подібного електрично активного середовища на міцнісні властивості лопаткових матеріалів проведено не було. У зв'язку з цим проблема дослідження негативного впливу електризованої пари на робочі лопатки вологопарових турбін та розробка методів їх захисту є актуальною науковотехнічною задачею.

## РОЗДІЛ 2

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІОНІЗОВАНОЇ ПАРИ ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА МІЦНІСНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНІ ЛОПАТКОВОЇ СТАЛІ

2.1 Електрохімічна система в турбінних решітках обумовлена зарядженістю потоку вологої пари і супутні ЕФЯ

Електрохімічні та ЕФЯ в останніх ступенях ЦНТ, виникаючі внаслідок зарядженості крапель, являють собою складну систему, причому вона істотно відрізняється від систем, що традиційно розглядаються в електрохімії. Фрагмент електрохімічної системи для останнього ступеня зображено на рис. 2.1.



Рис. 2.1 Схема останнього ступеня з ділянками електризації, перенесення і нейтралізації іонів: а: 1 – поверхня направляючої лопатки (область диспергування); 2 – потік з зарядженими частинками; 3 – поверхня робочої лопатки (область осадження); б – еквівалентна схема процесів

Особливість зображеної на схемі електрохімічної системи полягає в тому, що електроліт являє собою потік окремих крапель з іонами, що рухаються в потоці пари (діелектрика) від зони електризації до заземлених деталей в одному напрямку. При цьому в електроліті відсутній зустрічний рух аніонів та катіонів; перенесення заряджених частинок відбувається за рахунок механічної енергії потоку пари, а не під впливом електричного поля; на електродних поверхнях не виникають області поляризації електродів внаслідок обдування електродів потоком пари, що конденсується, і механічної дії крапель; в системі протікають імпульсні електрохімічні струми, механічні удари викликають локальне пошкодження окисних плівок на поверхні металу, що інтенсифікує протікання електрохімічних процесів [71]. Електрохімічні системи такого типу, як правило, не розглядають в рамках традиційної електрохімії [72]. Вигляд класичної електрохімічної системи зображений на рис. 2.2:



Рис. 2.2 Традиційна електрохімічна система

У аерозольній електрохімічній системі в турбіні спільно з механічним ерозійним процесом і проникненням в поверхню іонів і хімічно активних частинок можуть відбуватися процеси розчинення і вимивання з поверхні продуктів електрохімічних перетворень. На рис. 2.3 схематично зображено вплив контакту зарядженої краплі з поверхнею металу і проникнення іонів водню в дефекти поверхні.



Рис. 2.3 Схема процесу проникнення іонів в поверхню металу

Основним носієм зарядів (іонів) в потоці робочого тіла є частинки крапельної вологи парового потоку. При цьому великі краплі переважно заряджені позитивно, дрібні – негативно. Потік заряджених крапель породжує об'ємний електричний заряд в проточній частині турбіни і сумарний іонний струм. Протікання такого струму в проточній частині турбіни супроводжується виникненням магнітного поля струму і індукуванням блукаючих струмів в деталях проточної частини відповідно до закону електромагнітної індукції.

Магнітне поле елемента іонного струму в потоці пари визначиться відповідно до закону Біо-Савара-Лапласа [73]

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idlsin\alpha}{r^2} \tag{2.1}$$

де В – магнітна індукція елемента струму зарядженої пари;

 $\mu_0 - 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала;

*r* – відстань між елементом струму і точкою визначення магнітної індукції;

*I* – струм;

*dl* – довжина елемента струму;

 $\alpha$  – кут між dl і r.

Зміни магнітного поля потоку зарядженої пари, що пов'язані з нерівномірністю руху іонного струму і зміною густини об'ємного заряду в часі, породжують ЕРС, що індукує блукаючі струми в металевих поверхнях проточної частини [74]

$$e_i = -\frac{d\Phi}{dt},\tag{2.2}$$

де *e*<sub>i</sub>- ЕРС, що наводиться змінним в часі магнітним полем;

Ф- магнітний потік;

t – час.

Блукаючі струми здатні активувати електрохімічні процеси руйнування металевої поверхні, які в поєднанні з механічним навантаженням будуть призводити до прискореного накопичення пошкодженості і руйнування поверхні лопаток [75].

Ще однією особливістю електризації робочого тіла є виникнення об'ємного електричного заряду, що породжує електричне поле з постійною та змінною складовими. Ці фактори безумовно здатні суттєво впливати не тільки на електрохімічну активність, але і на характер механізму крапельно-ударної дії потоку пари на лопатки.

В цілому електрична активність робочого тіла спричиняє зміну його властивостей як ерозійно-корозійного функціонального середовища. Зазначені зміни властивостей робочого тіла потребують експериментального дослідження його дії на конструктивні матеріали лопаток турбін у широкому діапазоні швидкостей і за різноманітних режимів зарядженості потоку вологої пари.

## 2.2 Вибір методу дослідження міцнісних властивостей поверхневого шару лопаткової сталі

Дія вологопарового потоку на лопатки турбіни викликає їх пошкодження внаслідок виникнення ерозійно-корозійних процесів. При цьому на початковому етапі пошкодження відбувається накопичення структурних змін в матеріалі і відповідно зміна міцнісних властивостей поверхневого шару. Накопичення пошкодження поверхневим шаром матеріалу можна інтерпретувати як зменшення його суцільності, тобто виникнення і збільшення кількості структурних дефектів, що мають величину твердості, відмінну від твердості основного матеріалу, а також мікротріщин.

Оскільки в даному експериментальному дослідженні планована тривалість дії паро-крапельного потоку становить декілька годин, очікувана величина пошкодження матеріалу буде недостатньою для зовнішніх проявів руйнування, очікувані дефекти структури поверхні матимуть геометричні розміри, порівнянні з розмірами зерен, а поверхня матеріалу буде утворена переважно матеріалом матриці. Для експериментального дослідження такої пошкодженості необхідний метод неруйнівного контролю, що дозволяє визначати міцнісні властивості поверхневого шару матеріалу і наявність структурних неоднорідностей, які можна порівняти за величиною з розмірами зерен металу. Таким методом є дюраметрія (визначення мікротвердості). Мікротвердість можна розглядати як інтегральну характеристику міцності локального елемента поверхневого шару матеріалу, оскільки під час індентування, як і за будь-якого іншого виду механічних випробувань, матеріал послідовно зазнає 3-ї стадії зміни стану: пружної деформації, пружно-пластичної і руйнування [76], [77]. В даному дослідженні використовується метод Віккерса з індентуванням поверхні правильною чотиригранною алмазною пірамідою [78], [79].

Параметром, що дозволяє побічно оцінювати наявність і розподіл в матеріалі структурних неоднорідностей, є коефіцієнт варіації мікротвердості. Для його визначення на досліджувану поверхню металографічного шліфа наносять довільно відбитки з наступним їх виміром, визначенням мікротвердості і статистичною обробкою отриманих результатів [80].

2.3 Експериментальна перевірка впливу контакту зарядженого дисперсного середовища на міцнісні властивості лопаткової сталі

За умов електризації робочого тіла в турбіні в лопатковому апараті виникає специфічна електрохімічна система, в котрій поверхня робочих лопаток грає роль електрода. На цей електрод осідає потік іонів з зарядженого потоку робочого тіла і на поверхню електроду впливає електричне поле об'ємного заряду пари. Як відомо, під час протікання електрохімічних процесів в електрохімічній системі на поверхні електродів можуть відбуватися хімічні перетворення зі зміною хімічного складу і механічних властивостей поверхні електродів. З урахуванням цього розв'язання поставлених задач дослідження необхідно почати з визначення характеру зміни міцності поверхні (модельної ділянки властивостей електрода лопатки) V специфічній електрохімічній системі, з паро-крапельним середовищем **i**3 зарядженими краплями як носія іонних струмів.

Для розв'язання цієї задачі була сконструйована і виготовлена дослідницька установка, що створювала електричне поле і низькошвидкісний струмінь водяного туману з зарядженими крапельками, який мав контакт з поверхнею досліджуваного зразка лопаткової сталі [6]. Опис експериментальної установки. Експериментальна установка дозволяла отримувати вологу конденсовну пару, що витікала в атмосферу. Як генератор вологої пари використовували лабораторний котел ємністю 8 л, що працював за надлишкового тиску не більше 0,01 МПа. Як робоча рідина використовувалася дистильована вода. На рис. 2.4 зображена схема установки.



Рис. 2.4 Схема експериментальної установки [6]

Продуктивність генератора вологої пари становила до 1 кг/год (0,28 г/с) з температурою пари на виході з паропроводу в атмосферу в діапазоні 100 ÷ 102 °С. Швидкість потоку складала близько 0,3 м/с. З котла, що підігрівається, паропроводом пара потрапляла в направляючу скляну трубку і, проходячи через дрібнокомірчасту нержавіючу сітку, на яку подавали напругу 13,4 кВ, заряджалася і у вигляді струменя туману спливала в атмосферу. Найбільш імовірним механізмом заряду крапель в цьому випадку був перехід електронів від крапель до сітчастого електрода з утворенням в краплях позитивних іонів гідроксонію  $H_3O^+$  [81]

$$(H_2 O)_n \to (H_2 O)_n \cdot H^+ + \bar{e}.$$

За сіткою був встановлений ізолятор у вигляді пластини, на якій розташовувався зразок лопаткової сталі, що оброблявся. Зразок був заземлений через систему реєстрації струму заряджених частинок, які осідають на зразку. Потенціал високовольтного сітчастого електрода був позитивний. На сітці пара частково конденсувалася і на ній утворювалась невелика кількість крапель вологи. За сіткою потік пари був у вигляді струменя туману. Оскільки зазвичай діаметр крапель в тумані становить від 2 до 120 мкм, середній діаметр крапель, що осідають на зразок, вважали таким, що дорівнює 60 мкм. На рис. 2.5 – 2.6 показано розташування зразка на стенді і обдування парою.



Рис. 2.5 Розташування зразка і сітчастого електрода



Рис. 2.6 Процес обдування парою зразка лопаткової сталі 20X13

Відстань від поверхні зразка до високовольтного електрода становила 15 мм. Площа високовольтного електрода була істотно більше оброблюваної площі зразка, для забезпечення однорідності поля на поверхні зразка. Контроль іонізації струменя пари проводився за допомогою стрілочного мікроамперметра. Напругу високовольтного джерела піднімали до рівня, що дозволяв реєструвати струм в ланцюзі заземлення. В умовах експерименту струм заземлення, що дорівнював приблизно 1 мкА, з'явився за напруги між сіткою і зразком 13,4 кВ. На рис. 2.7 показано схему дії електризованої пари і електричного поля на зразок.



Рис. 2.7 Схема дії потоку пари й електричного поля на поверхню сталевого зразка

На рис. 2.8 показано двовимірне зображення розподілу електричного поля на поверхні зразка, поверненої до сіткового електрода, в площині, що є перпендикулярною електроду, а також графік напруженості електричного поля уздовж лінії, що з'єднує центри електрода і зразка.



Рис. 2.8 Напруженість електричного поля між сітковим електродом і зразком сталі без урахування об'ємного заряду пари

Як видно з рисунка, напруженість поля на поверхні зразка приблизно того ж порядку, що і напруженість, виміряна за останнім ступенем турбіни (~2×10<sup>5</sup> B/м) [33], в подібному полі знаходяться задні кромки робочих лопаток останнього ступеня.

Методика експерименту. На експериментальній установці створювалися умови, за яких на поверхню зразка лопаткової сталі 20Х13 впливав заряджений потік вологої пари, що конденсувалася, з розміром крапель орієнтовно не більше 120 мкм. Цей потік не створював ударного навантаження крапель на поверхню (швидкість менше 1 м/с), а також електричне поле з напруженістю на поверхні зразка ~7,5·105 В/м (~7,5 кВ/см). Створювані умови дозволяли досліджувати електрохімічну компоненту пошкодженості поверхні з мінімальною механічною дією потоку пари.

Як модель фрагмента поверхні робочої лопатки була використана поверхня зразка сталі 20Х13 у вигляді паралелепіпеда з розмірами 56 × 18 × 17 мм (рис. 2.9). Поверхня зразка готувалася до вимірювань мікротвердості відповідно до вимог ГОСТу 2789-73. На підготовленому зразку вибиралася область для індентування всередині полірованої грані (рис. 2.10).



Рис. 2.9 Зразок сталі 20Х13



Рис. 2.10 Розташування області індентування на зразку

У вибраній області поверхні проводилося індентування на приладі ПМТ-3 [78] так, щоб відбитки покривали досліджувану поверхню приблизно рівномірно. В результаті отримували варіаційний ряд значень мікротвердості ділянки поверхні. Початкове значення мікротвердості визначали за навантажень на індентор 10, 30 і 50 г. Після визначення вихідної мікротвердості до поверхні зразка припаювався



Рис. 2.11 Зразок сталі 20X13 з проводом заземлення

дріт заземлення, як показано на рис. 2.11.

Зразок встановлювався на діелектричну площадку експериментальної установки і підключався до ланцюга заземлення. Включався генератор пари, і з появою струменя пари, що конденсувалася, подавалася висока напруга на сітчастий електрод. Висока напруга позитивної полярності подавалася плавно до появи струму в ланцюзі заземлення зразка (приблизно 1 мкА). Зразок піддавався дії зарядженого струменя пари 1,5 год, після чого установка вимикалася і проводилися вимірювання мікротвердості; нанесення відбитків індентування по поверхні проводилося аналогічно початковому.

Вимірювані параметри й оцінка похибки вимірів. Мікротвердість в експерименті визначалася за допомогою приладу ПМТ-3 за методикою випробування мікротвердості ГОСТ 9450-76 [79]. Згідно з паспортними даними прилад забезпечує вимір в одиницях твердості  $H_{\mu}$  до 200 г із відносною похибкою ±5 %.

Вимірювання проводилося шляхом вдавлення алмазного індентора у формі піраміди із квадратною основою в поверхню зразка. Внаслідок вдавлення на поверхні утворюється квадратний відбиток. У відбитку вимірюються діагоналі  $d_1$  і  $d_2$  за допомогою мікроскопа, після чого знаходять їх середнє арифметичне за формулою

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2}{2} \,. \tag{2.3}$$

Ця величина приймається за розрахункову довжину діагоналі відбитка. Для кожного відбитка діагональ вимірюється 3 рази. Як остаточний результат діагоналі береться середнє значення трьох вимірів. Число мікротвердості  $H_{\mu}$  являє собою частку від ділення навантаження P на бічну поверхню F відбитка в припущенні, що кути у відбитка такі ж, як у самої піраміди

$$H_{\mu} = \frac{P}{F} . \tag{2.4}$$

Оскільки для чотиригранної піраміди з кутом між протилежними гранями 136<sup>0</sup>

$$F = \frac{d^2}{2Sin68^\circ} = \frac{d^2}{1,854} , \qquad (2.5)$$

то для чотиригранної піраміди з кутом між протилежними гранями

$$H_{\mu} = \frac{1,854 P}{d^2} , \qquad (2.6)$$

де Р – навантаження на піраміду, кг;

*d* – середнє арифметичне довжини обох діагоналей відбитку після зняття навантаження, мм.

Якщо Р виражене в грамах а d в мікрометрах, то розмірність числа микротвердості  $H_{\mu}$  буде кг/мм<sup>2</sup>

$$H_{\mu} = \frac{1854 P}{d^2}.$$
 (2.7)

Середнє значення  $\overline{H_{\mu}}$  мікротвердості визначалося за формулою

$$\overline{H_{\mu}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (H_{\mu})_i, \qquad (2.8)$$

де  $(H_{\mu})_i$  – результат *i*-го вимірювання мікротвердості;

*n* – кількість вимірювань.

Глибина *h* відбитка для пластичних матеріалів, у яких немає пружного становлення, визначається формулою

$$h = \frac{d}{2\sqrt{2} \cdot tg(0,5\alpha)},\tag{2.9}$$

яка для  $\alpha = 136^{\circ}$  набуває вигляду  $h \approx d/7$ .

Середня квадратична похибка вимірювань, дисперсія, коефіцієнт варіації оцінювалися за формулами [82], [83]

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left( (H_{\mu})_i - \overline{H_{\mu}} \right)^2}{(n-1)}}.$$
 (2.10)

Дисперсія

$$S^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left( (H_{\mu})_{i} - \overline{H_{\mu}} \right)^{2}}{(n-1)}.$$
(2.11)

Коефіцієнт варіації

$$C_{\nu} = \frac{s}{\overline{H_{\mu}}} \cdot 100 \%.$$
 (2.12)

Ступінь відносної зміни мікротвердості поверхні після дії розраховувався за формулою

$$\varepsilon(H_{\mu}) = \frac{(H_{\mu})_{i}^{*} - \overline{H_{\mu}}}{\overline{H_{\mu}}} \cdot 100 \%, \qquad (2.13)$$

де  $(H_{\mu})_{i}^{*}$  – значення мікротвердості *i*-го вимірювання обробленої поверхні.

За навантаження на індентор, що дорівнює 10 г виміри проводилися по 20 точках. Для навантажень 30 г і 50 г виміри проводилися по 10 точках.

**Результати експерименту.** Результати вимірювань мікротвердості  $H_{\mu}$  поверхні досліджуваного зразка сталі 20Х13 в початковому стані і після обдування вологопаровим потоком наведені в табл 2.1 – 2.3. В експерименті заряд крапельок туману був позитивний.

Таблиця 2.1 Значення  $H_{\mu}$  вихідної і обробленої парою поверхні, навантаження індентування Р = 10 г

Hower	Початковий	стан поверхні	Після дії пари		
номер вимірю- вання	Діагональ відбитка <i>d</i> , мкм	$(H_{\mu})_{i},$ кг/мм $^{2}$	Діагональ відбитку, <i>d</i> <sup>*</sup> , мкм	$(H_{\mu})_{i}^{*},$ кг/мм $^{2}$	
1	10,85	157	13,33	104	
2	9,3	214	12,4	121	
3	10,54	167	11,01	153	
4	9,61	201	13,95	95	
5	7,75	309	15,81	74	
6	11,78	134	13,02	109	
7	11,78	134	13,48	102	
8	9,61	201	17,51	60	
9	9,61	201	12,55	118	
10	9,92	188	15,03	82	
11	8,68	246	13,79	97	
12	8,99	229	11,78	134	
13	10,23	177	15,65	76	
14	11,47	141	13,02	109	
15	10,85	157	16,89	65	
16	10,23	177	18,91	52	
17	10,23	177	14,57	87	
18	9,3	214	31,15	19	
19	10,23	177	14,88	84	
20	10,23	177	17,98	57	

Таблиця 2.2 Значення $H_{\mu}$	вихідної	i	обробленої	паром	поверхні,
навантаження індентування Р = 30 г					

Hower	Початковий	стан поверхні	Після дії пари		
вимірю- вання	Діагональ відбитку <i>d</i> , мкм	( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i>, кг/мм<sup>2</sup></sub>	Діагональ відбитку, <i>d</i> <sup>*</sup> , мкм	$(H_{\mu})_{i}^{*}, \ \kappa {\Gamma/{ m MM}}^{2}$	
1	16,12	214	21,86	116	
2	15,5	232	20,31	135	
3	15,5	232	20,93	127	
4	15,5	232	22,79	107	
5	14,26	274	22,32	112	
6	14,88	251	25,11	88	
7	14,26	274	24,65	92	
8	15,19	241	25,73	84	
9	16,12	214	24,80	90	
10	15,5	232	22,63	109	

Таблиця 2.3 Значення  $H_{\mu}$  вихідної і обробленої парою поверхні, навантаження індентування Р = 50 г

Howen	Початковий	стан поверхні	Після дії пари		
вимірю- вання	Діагональ відбитку <i>d</i> , мкм	$(H_{\mu})_i,$ кг/мм $^2$	Діагональ відбитку, <i>d</i> *, мкм	$\left(H_{\mu} ight)_{i}^{*},$ kg/mm $^{2}$	
1	21,7	197	27,28	125	
2	18,91	259	27,13	126	
3	19,22	251	28,06	118	
4	20,5	221	27,75	120	
5	18,9	259	29,30	108	
6	20,2	228	27,90	119	
7	18,9	259	27,44	123	
8	19,8	236	29,61	106	
9	19,5	243	27,90	119	
10	18,6	268	29,14	109	

Аналіз даних першого експерименту. Отримані результати за навантажень на індентор 10, 30, 50 г показані на рис. 2.12 і рис.2.13. У таблиці 2.4 наведені значення мікротвердості і статистичних характеристик експериментальних даних до і після дії зарядженою парою.







Таблиця 2.4 Значення мікротвердості і статистичних характеристик експериментальних даних до і після дії зарядженою парою

Статистична	рою	Контроль Після дії зарядженою парою				
характеристика	Навантаження, г					
	50	30	10	50	30	10
$\overline{H}_{\mu}$ кг/мм $^2$ , середн $arepsilon$	117	106	90	254	239	189
Середня глибина, мкм	4,0	3,3	2,2	2,7	2,2	1,4
$H_{\mu}$ кг/мм <sup>2</sup> , Максимум	126	135	153	308	274	309
$H_{\mu}$ кг/мм $^2$ , Мінімум	106	84	19	197	214	134
Розмах варіації	20	51	134	111	59	175

93	25	44	149	48	17	Відносний розмах варіації, %
41	21	30	31	17	7	Стандартне відхилення, <i>S<sub>n</sub></i>
1712,6	445,1	895,9	967,2	297,4	51,6	Дисперсія, S <sup>2</sup>
0,22	0,9	0,12	0,35	0,16	0,6	Коэфіцієнт варіації, С <sub>v</sub>
10	15	19	15	23	28	Середня діагональ відбитку, мкм

У таблиці наведені такі статистичні характеристики варіаційних рядів даних:

– середнє значення мікротвердості  $\overline{H}_{\mu}$  кг/мм<sup>2</sup>;

- середня глибина відбитка, мкм;

- максимальне значення мікротвердості  $H_{\mu}$  кг/мм<sup>2</sup>;
- мінімальне значення мікротвердості  $H_{\mu}$  кг/мм<sup>2</sup>;
- розмах варіації ряду значень мікротвердості  $H_{\mu}$  кг/мм<sup>2</sup>;
- відносний розмах варіації ряду значень мікротвердості, %;
- стандартне відхилення  $S_n$ ;
- дисперсія  $S^2$ ;
- коефіцієнт варіації  $C_{\nu}$ ;
- середнє значення діагоналі відбитка, мкм.

З результатів графічної обробки експериментальних даних, наведених на рис. 2.14, видно, що у вихідному стані середнє значення мікротвердості досліджуваної ділянки поверхні нелінійно зростає зі збільшенням глибини індентування.



Рис. 2.14 Залежність мікротвердості поверхневого шару від глибини індентування

Характер зміни кривої обумовлений особливостями поверхневого шару товщиною до 2 мкм. Мікротвердість поверхневого шару нижче, ніж у серцевини до 20 %, це свідчить про відсутність наклепу під час підготовки поверхні зразка до експерименту. Мікротвердість на глибині індентування понад 2 мкм відрізняється не більше ніж на 7%, що означає задовільну структурну однорідність серцевини.

Дія зарядженою парою істотно знижує середні значення мікротвердості на глибину індентування до 4 мкм. Вигляд залежності мікротвердості від глибини індентування лінійний, що означає зміну структури металу й на більш глибокому рівні серцевини. Границя структурних змін поверхневого шару по глибині не була визначена, оскільки індентування проводилося за навантаження до 50 г, як і для контрольних вимірів. Кут нахилу кривої не більше 10<sup>0</sup>, що означає однорідність зміненої структури по глибині не менше 4 мкм.

Характер неоднорідності мікротвердості по шарах до дії парою: відносний розмах варіації до глибини 2 мкм був 93 %, а коефіцієнт варіації 0,22. Це означає однорідність верхньої частини поверхневого шару, з наявністю невеликої кількості порівняно великих структурних недосконалостей, локалізованих в об'ємі, що є близьким до об'єму одного відбитка за навантаження 10 г. На глибині понад 2 мкм відносний розмах варіації знижується більш ніж в 3 рази до 0,25, а потім трохи

зростає. Це інтерпретується як відсутність у серцевині поверхневого шару великих дефектів структури.

Після дії зарядженою парою значно збільшується відносний розмах варіації мікротвердості за навантажень на індентор 10 і 30 г: відповідно на 60 % і 92 %, при цьому знижуються середні значення мікротвердості відповідно на 52 % і на 56 %. Коефіцієнт варіації значень мікротвердості зростає для цих навантажень на 59 % і 77 %. Це обумовлено утворенням дефектів структури на глибині 3 мкм і більше. У поверхневих шарах формуються дефекти різної величини. Істотно збільшується кількість дефектів структури на глибині від 2 до 3,3 мкм. За навантаження 50 г значення відносного розмаху варіації й коефіцієнта варіації знижуються, шо означає утворення на глибині порядку 4 мкм і більше дрібномасштабних структурних дефектів.

За підсумками експерименту можна припустити, що основний вплив на механічні властивості поверхневого шару металевого зразка чинить поглинання іонів і в основному наводнювання поверхні під час контакту із зарядженим парокраплинним потоком. Процеси електризації крапель та їх розряду на металевій поверхні можна подати у наступному вигляді:

1) механізм утворення позитивно зарядженої краплі на заряджаючому електроді (заряд краплі)

$$H_2 O - \bar{e} \to H^+ + O H^0.$$
 (2.14)

Молекула води з краплі віддає електрон позитивно зарядженому електроду (сітці), в результаті утворюється позитивно заряджений іон водню і нейтральна гідроксогрупа  $OH^0$ . Гідроксильний радикал, як сильний окислювач, взаємодіє з матеріалом сітки, а крапля, що відлітає до зразка, заряджається позитивно, утримуючи в собі іон (іони) водню. Вираз для зарядженої краплі можна записати у вигляді

$$(H_2 0)_n \cdot z H^+,$$
 (2.15)

де z – кількість іонів, захоплених краплею;

2) механізм розряду краплі на заземленому електроді (катоді)

$$(H_2 0)_n \cdot zH^+ + z\bar{e} \to zH^0 + nH_2 0$$
 (2.16)

з утворенням на поверхні зразка атомарного водню [33]. Атомарний водень є активним елементом і далі трансформується або в молекулярну форму  $H_2$ 

$$2H \to H_2,$$
 (2.17)

або поглинається поверхнею металу. У свою чергу, молекули водню в іскровому електричному розряді під час контакту зарядженої краплі з заземленою поверхнею можуть розкладатися на позитивні і негативні іони

$$\begin{array}{c} E \\ H_2 \leftrightarrow H^+ + H^- \end{array}$$
 (2.18)

які також можуть поглинатися поверхнею або переходити в молекулярну форму. Атомарний водень може бути в структурі металу або в дифузійно-рухомій формі, або реагувати з атомами металу

$$H^0 + [Me] \to [MeH]. \tag{2.19}$$

Однак для цієї реакції потрібна активна поверхню металу без окислів. В даному випадку поверхня не зазнає інтенсивного механічного впливу, що призводить до пошкодження окисних плівок, і реакція (2.18) малоймовірна.

Висновки з аналізу першого досліду: контакт металевої поверхні з потоком зарядженого аерозолю, навіть за низьких швидкостей обтікання викликає помітну зміну міцнісних властивостей і гетерогенності поверхневого шару металу; порівняння результатів виміру мікротвердості поверхневого шару на різних глибинах до й після дії пари й електричного поля показує істотне зниження середніх значень мікротвердості досліджуваних поверхневих шарів металу більш ніж на 50 %; причина деградації міцнісних властивостей поверхні металу пов'язана з електричною взаємодією заряджених крапель води й поверхні металу, а також впливу електричного поля на поверхню металу; найбільш імовірним механізмом деградації міцнісних властивостей поверхневого шару металу є структурні зміни кристалічних обумовлені дифузією ґраток, іонів водню під впливом

электрофізичних процесів на поверхні зразка, а також електрохімічні перетворення на поверхні й у глибині поверхневого шару.

Наслідком розглянутих зарядно-розрядних процесів з хімічними перетвореннями на поверхні зразка лопаткової сталі має бути зростання гетерогенності поверхневого шару, що й підтверджується отриманими результатами виміру мікротвердості. Однак з огляду на те, що поверхня зразка оброблялася в контакті з атмосферним повітрям, причиною збільшення гетерогенності й зменшення мікротвердості можуть бути не тільки іони водню, але й інші позитивно заряджені іони, що виникають, наприклад, під час іонізації повітря, що ускладнює інтерпретацію отриманих результатів.

У зв'язку із цим було проведене дослідження ролі зарядженої вологої пари (як донора іонів водню) в описаному вище експерименті. Для цього був здійснений аналогічний експеримент, у якому волога пара була замінена струменем стисненого повітря.

2.4 Експериментальне визначення ролі заряджених крапель води за умов дії паровим потоком на поверхню лопаткової сталі

Для визначення ролі крапель воді в попередньому експерименті, був проведен дослід в якому поверхня зразка лопаткової сталі піддавалась дії потоку атмосферного повітря. Експериментальна установка була перероблена в такий спосіб: випарний котел був заменений на мініатюрний компресор. Вхід парової магістралі був підключений до компресора, що давав струмінь повітря зі швидкістю, яка відповідала швидкості струменя використаного раніше генератора пари. Схема експериментальної установки наведена на рис.2.15. Експозиція зразка в струмені повітря становила як і в попередньому експерименті 1,5 год, після чого досліджувалася мікротвердість поверхні.

Поверхня зразка перебувала під впливом електричного поля, але на неї не осідали заряджені краплі води. Схема процессів в експерименті подана на рис.2.16. Електричний режим системи іонізації був ідентичним попередньому, але струм осідання іонів мікроамперметром не реєструвався (був значно нижче чутливості приладу).



Рис. 2.15 Схема експериментальної установки

![](_page_65_Figure_3.jpeg)

Рис. 2.16 Схема процесів в експерименті

**Результати експерименту зі струменем повітря.** В експерименті використовувався зразок сталі 20Х13. Результати вимірювань в таблицях 2.5 – 2.7.

Таблиця 2.5 Значення  $H_{\mu}$  вихідної і обробленої повітрям поверхні, за навантаження на індентор P = 10 г, потенціал на сітчастому електроді позитивний.

Howen	Початковий	стан поверхні	Після дії повітря		
вимірю- вання	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	$(H_{\mu})_i,$ кг/мм $^2$	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	${(H_{\mu})_i}^*, \ { m kg}/{ m Mm}^2$	
1	11,00	153	9,35	212	
2	10,56	166	11,44	142	
3	11,11	150	10,34	173	
4	11,33	144	9,57	202	
5	11,77	134	12,10	127	
6	13,64	100	11,99	129	
7	12,87	112	12,76	114	
8	11,22	147	10,89	156	
9	10,56	166	10,01	185	
10	11,55	139	10,67	163	

Таблиця 2.6 – Значення  $H_{\mu}$  вихідної і обробленої повітрям поверхні за навантаження на індентор P = 30 г

Howen	Початковий (	стан поверхні	Після дії повітря		
вимірю- вання	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i>, кг/мм<sup>2</sup></sub>	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	$(H_{\mu})_{i}^{*},$ кг/мм $^{2}$	
1	17,05	191	14,96	249	
2	15,73	225	16,5	204	
3	17,05	191	15,62	228	
4	16,17	213	16,28	210	
5	18,48	163	16,06	216	
6	17,71	177	9,9	567	
7	16,17	213	14,74	256	
8	17,6	180	14,41	268	
9	17,6	180	15,29	238	
10	17,49	182	16,61	202	

Howen	Початковий с	тан поверхні	Після дії повітря		
вимірю- вання	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	$(H_{\mu})_{i}, \ { m kf/mm}^2$	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	${(H_{\mu})}_i^*, \ { m kgmmm{Kf/mm}^2}$	
1	21,23	206	18,70	265	
2	22,55	182	18,15	281	
3	20,68	217	18,48	271	
4	20,79	214	18,15	281	
5	20,9	212	17,82	292	
6	19,03	256	18,26	278	
7	19,58	242	18,70	265	
8	18,92	259	18,92	259	
9	18,59	268	18,70	265	
10	21,12	208	18,15	281	

Таблиця 2.7 – Значення  $H_{\mu}$  вихідної і обробленої повітрям поверхні за навантаження на індентор P = 50 г

Аналіз даних експерименту з обдувом поверхні зразка струменем повітря. Отримані результати за навантажень на індентор 10 г, 30 г, 50 г показані на рис. 2.17, 2.18. У таблиці 2.9 наведено значення мікротвердості і статистичних характеристик експериментальних даних до і після дії струменем повітря.

![](_page_67_Figure_3.jpeg)

![](_page_67_Figure_4.jpeg)

![](_page_67_Figure_5.jpeg)

Контроль зар			заря	Після дії дженою па	рою	
Навантаження, г						Статистична характеристика
10	30	50	10	30	50	
141	191	226	160	263	274	$\overline{H}_{\mu}$ кг/мм <sup>2</sup> , середнє
1,7	2,4	2,9	1,6	2,1	2,6	Середня глибина, мкм
166	225	268	212	568	292	H <sub>µ</sub> кг/мм <sup>2</sup> , Максимум
100	163	182	114	202	259	Н <sub>µ</sub> кг/мм <sup>2</sup> , Мінімум
66,61	61,92	85,94	98,2	365,89	32,96	Розмах варіації
47	32	38	61	139	12	Відносний розмах варіації ,%
21,53	19,46	28,04	33,13	109,1	10,39	Стандартне відхилення, <i>S</i> <sub>n</sub>
463,44	378,69	786,5	1097,78	11903,6	108,04	Дисперсія, <i>S</i> <sup>2</sup>
15	10	12	21	41	4	Коэфіцієнт варіації, $\mathcal{C}_{oldsymbol{ u}}$
11,5	17,1	20,3	11	15	18	Середня діагональ відбитку, мкм

Таблиця 2.9 значень мікротвердості і статистичних характеристик експериментальних даних до і після дії струменем повітря

![](_page_68_Figure_2.jpeg)

Рис. 2.19 Залежність мікротвердості поверхневого шару зразка від глибини індентування

З наведених у таблицях та рисунках результатів видно, що характер зміни величини мікротвердості поверхні досліджуваного зразка, що зазнає дії струменя повітря, істотно відрізняється від дії зарядженим паро-краплинним потоком. Якщо дія пари із зарядженими краплями призводить до зменшення мікротвердості поверхні на всіх трьох досліджених навантаженнях на індентор більш ніж на 50 %, то дія струменем повітря й електричним полем приводить до збільшення мікротвердості в поверхневому шарі глибиною до ~ 1,5 мкм на 13 %, глибиною 2 мкм – на 37 %, глибиною понад 2,5 мкм – на 21 %.

Залежність мікротвердості від глибини індентувания показує, що на глибині поверхневого шару від 2,2 мкм і більше процес формування структурних недосконалостей досяг насичення (див. рис.2.19).

Розмах варіації значень мікротвердості зразка після дії повітрям зростає на всіх глибинах індентувания, з максимальним збільшенням понад 4 рази на глибині індентування ~2 мкм.

Отримані залежності мікротвердості показують, що формування структурних недосконалостей у поверхневому шарі металу, що обдувається потоком повітря без водяної пари, відбувається інакше, ніж за наявності води. У поверхневому шарі зразка на глибині до 2 мкм формується зміцнений шар, обумовлений дифузією позитивних іонів з повітря. Мала глибина проникнення домішок, імовірно, пов'язана з розмірами іонів, які істотно більше іонів водню (що переважають під час обдування водяною парою) і відповідно мають меншу проникну здатність у поверхню металу. Їхня взаємодія з поверхнею приводить до локального утворення сполук у вигляді моноатомних плівок (наприклад, азотистих, окисних або інших), що сприяють гетерогенному підвищенню мікротвердості металу. Істотне збільшення і відносного розмаху варіації та коефіцієнта варіації також свідчить про появу значної кількості великих структурних неоднорідностей в поверхневому шарі до 2 мкм, що можна інтерпретувати як утворення поверхневої плівки іонами повітря в електричному полі, що діє на поверхню зразка.

Висновки по першим двум експериментам. Виявлено факт значного впливу на міцнісні властивості поверхневого шару лопаткової сталі електрохімічних

процесів, що виникають в електрохімічній системі з дисперсним електролітом і електричним полем, які діють на поверхню зразка. Дія потоком пари з зарядженими краплями й електричного поля істотно відрізняється від дії потоком повітря і електричного поля.

Причина змін міцнісних властивостей пов'язана з процесами на поверхні, в результаті яких в поверхневий шар проникають іони, що призводять до хімічних і структурних змін в поверхневих шарах металу, а також до зміні поверхневої енергії металу в електричному полі. Найбільш імовірним механізмом негативного впливу позитивно зарядженої пари на поверхню лопатки сталі є наводнювання металу. Стосовно до робочих лопаток турбіни це означає, що зміна в результаті електризації фізико-хімічних властивостей водяної пари як функціонального середовища, що контактує з поверхнею лопаток, здатна істотно впливати на міцнісні властивості поверхневого шару лопаток. Зміни властивостей робочого середовища в результаті ЕФЯ можуть знизити або збільшити стійкість поверхні до механічних навантажень, зокрема збільшити швидкість накопичення пошкодженості поверхні за крапельноударної дії на поверхню лопаток. На підставі отриманих даних можна зробити висновок про можливість збільшення ресурсу роботи лопаток за рахунок керування електричною активністю середовища, в тому числі за рахунок підбору ВХР.

2.5 Дослідження дії високошвидкісного струменя електризованої вологої пари на вміст водню в лопатковій сталі

Постановка задачі дослідження. На даному етапі дослідження, на відміну від попередніх експериментів, розв'язувалася задача вивчення комплексної механоелектрохімічної дії зарядженого парового потоку на насичення воднем зразка лопаткової сталі за надзвукової швидкості потоку.

У реальній турбіні поверхні проточної частини зазнають впливу високошвидкісного потоку вологої пари, що містить краплі різної величини з електричним зарядом як позитивного, так і негативного знаку. В результаті потік чинить одночасну механічну крапле-ударну та електрохімічну дію на поверхні проточної частини. Для імітації подібного потоку був підготовлений стенд, що дозволяв отримувати надзвуковий струмінь пари, що конденсувалася, витікаючи в атмосферу . Структурна схема стенду на рис. 2.20, схема дії струменем пари на поверхню зразка на рис. 21. При цьому була можливість надавати струменю пари позитивний або негативний заряд. Електричне поле за даних умов на поверхню додатково ніяк не накладалося. Вплив електричного поля був тільки від струменя іонізованої пари, що відповідає умовам в натурній турбіні під час електризації потоку пари.

![](_page_71_Figure_1.jpeg)

Рис. 2.20 Структурна схема стенду

![](_page_71_Figure_3.jpeg)

Рис. 2.21 Схема дії на поверхню зразка струменем пари і його електричним полем

Стенд для дії на зразок високошвидкісним струменем електризованої пари. Для проведення випробувань в умовах, подібних існуючим в проточній частині турбіни, була модернізована установка [4], розроблена для вивчення процесів течії потоку надзвукової іонізованої пари. Загальний вигляд установки показаний на рис.2.22.


Рис. 2.22 Загальний вигляд установки

Основний елемент установки – паровий котел з іонізаційною камерою та сопловим апаратом. Випарна камера котла і внутрішні деталі були виготовлені з нержавіючої сталі. У донній частині котла розташовувалися ТЕНи, живильний і дренажний патрубки, шламозбірник. У бічній частині були врізані патрубки датчиків системи контролю і сигналізації рівня води в котлі і патрубки скляного водомірного пристрою. Для зменшення амплітуди пульсацій тиску в котлі був встановлений випарник гнотового типу. Гніт випарника був виготовлений у вигляді чотирьох коаксіально встановлених тканинних циліндрів висотою ~ 200 мм. Така конструкція випарника з розвиненою поверхнею забезпечувала необхідну витрату пари за пульсацій тиску не більше ± 10 Па. У зоні парової фази встановлені тарілчасті відбивачі для захисту вихідної парової магістралі від попадання бризок киплячої води. Для регулювання температури у верхній частині паропроводу був встановлений пароперегрівник електричного типу. Вихід пароперегрівника з'єднувався з іонізаційною камерою. На виході іонізаційної камери розташоване надзвукове сопло, за яким встановлювався вузол кріплення зразків лопаткової сталі.

Принципова схема експериментального стенда наведена на рис. 2.23.



Рис. 2.23 Схема парового стенда з іонізацією пари коронним розрядом: 1 – джерело високої напруги; 2 – високовольтний ввід; 3 – іонізаційна камера котла; 4 – соплова частина іонізаційної камери; 5 – пароперегрівник; 6 – котел; 7 – джерело живлення котла; 8 – система попереднього підігріву води; 9, 10, 11 – буферні ємності; 12 – вимірник температури; 13 – зразок лопаткової сталі; 14 – паропровід скидання пари в атмосферу за межі лабораторії; 15 – реєстратор струму заземлення; 16 – живильний насос

Електрична потужність нагрівників котла становила 6 кВт. Регульований нагрів забезпечувався групою ЛАТРів, керованих автоматичною системою стабілізування напруги з електроприводом. Для живлення котла використовувалася водопровідна вода. На стенді підтримувався режим роботи з тиском перед соплом  $P \sim 176$  кПа, температурою пари t ~ 126 °C, витратою пари G ~ 2,3 г/с, швидкістю  $\upsilon \sim 400$  м/с. Температура живильної води становила 108 ÷ 112 °C, тиск 309 ÷ 310 кПа.

Іонізація пари проводилася коронним розрядом в іонізаційній камері. Конструкція іонізаційної камери наведена на рис. 2.24.



Рис. 2.24 Конструкція іонізаційної камери [4]: 1 ізолятор, 2 – гайка, 3 – гумова прокладка, 4 – корпус електроду, 5 – фланець, 6, 7 – електроди, 8 – голка іонізатору, 9 – патрубок пароперегрівача, 10 – кабель високої напруги

Усередині іонізаційної камери на виході пароперегрівача 9 перед соплом для іонізації пари встановлений коронуючий електрод 7 з голчастим іонізатором 8, підключений до високовольтного джерела живлення типу ВС-20-10. Коронний розряд в потоці пари виникав між голкою іонізатора 8 і краями вихідного отвору в Високовольтне BC-20-10 корпусі камери паровпуску. джерело дозволяло регулювати електричний режим коронного розряду. Для вимірювання напруги на коронуючому електроді 7 використовувався кіловольтметр С-90. Реєстрація струму заряджених частинок, що осідають на зразку, проводилася за допомогою цифрового мікроамперметра Щ300. Зовнішній вигляд вихлопної частини іонізатора наведено на рис. 2.25.



Рис. 2.25 Зовнішній вигляд іонізаційної камери

Потік пари з іонізаційної камери виходив в конфузорно-дифузійне сопло (рис. 2.26), в якому за перепаду тиску 50 кПа розганявся до швидкості близько 400 м/с.



Рис. 2.26 Надзвукове сопло [4]: 1 – пластини профільні, 2 – пластини плоскі, 3 – корпус

Конденсація пари починалася поблизу поверхні зразка у вигляді струменя нещільного туману. Розмір крапель візуально оцінювали як такий, що не перевищує 120 мкм. На рис. 2.27 струмінь пари конденсується у вигляді факела туману, що прямує в парову магістраль скидання в атмосферу.



Рис. 2.27 Надзвуковий струмінь пари

Протягом усього експерименту стабільність параметрів роботи котла підтримувалася автоматичною системою стабілізації нагріву на базі системи збору даних і керування «OBEH». Ця ж система дозволяла записувати в файл реєстровані параметри роботи стенда.

Методика експерименту. Для досліджень використовувалися плоскі зразки розміром 10×7×1 мм, вирізані з пера турбінної лопатки, виготовленої зі сталі 15Х11МФШ. Після механічної обробки зразки піддавалися термообробці для зняття

внутрішніх напружень. Після термообробки поверхня зразків шліфувалася, а потім її полірували відповідно до вимог ГОСТу 9450-76 для визначення мікротвердості. На підготовленому зразку вибиралася область поверхні для досліджень і за допомогою приладу ПМТ-3 проводилися вимірювання вихідної мікротвердості за двох навантажень на індентор – 10 і 50 г. Для встановлення зразка в струмінь пари було виготовлено діелектричне пристосування для його кріплення, яке встановлювали за соплом на вході в парову магістраль. Вузол кріплення забезпечував необхідне положення оброблюваної поверхні зразка щодо струменя пари, а також електричну ізоляцію зразка від деталей експериментальної установки. Зразок встановлювався таким чином, щоб струмінь пари вдаряв приблизно в середину відполірованої грані. До досліджуваного зразка прикріплювався провідник, який дозволяв вимірювати потенціал, що наводився на зразку потоком пари, або струм, який стікав на заземлений зразок із зарядженого парового потоку. Дія на зразки здійснювалася в режимах з позитивною і негативною іонізацією пари. Знак електричного заряду іонізації й інтенсивність регулювати пари можна було допомогою 3a високовольтного джерела і комутаційних пристроїв.

Режими електричного впливу. У проведених раніше експериментах на реальних турбінах було з'ясовано, що паровий потік в ЦНТ і на вихлопі турбіни може мати позитивний, негативний або близький до нейтрального електричний заряд. Найчастіше в реальній турбіні великодисперсні краплі заряджені позитивно, а дрібні негативно. Крім того, робочі лопатки, як правило, мають певний електричний потенціал, обумовлений величиною опору системи заземлення. Величина цього потенціалу мінімальна: не перевищує одиниць вольт якщо система заземлення працює в штатному режимі, проте в деяких випадках потенціал може бути істотно вище (наприклад, за несправності системи заземлення ротора).

Виходячи з цих варіантів була розроблена система режимів іонізації пари під час обробки зразків сталі:

- нульовий (0) без іонізації; зразок не заземлений;
- нульовий перегрітий (0П) перегріта пара без іонізації, зразок заземлений;

- нульовий вологий (0В) волога пара без іонізації, зразок заземлений;
- перший вологий (1В) пара заряджена позитивно, зразок заземлений;
- другий вологий (2В) пара заряджена негативно, зразок заземлений;
- третій вологий (3В) пара заряджена позитивно, зразок має позитивний потенціал;
- четвертий вологий (4В) пара заряджена позитивно, зразок має негативний потенціал;
- п'ятий вологий (5В) пара заряджена негативно, зразок має негативний потенціал;
- шостий вологий (6В) пара заряджена негативно, зразок має позитивний потенціал.

Режими обробки зразків зведені в таблицю 2.9.

Таблиця 2.9 Режими обробки зразків паровим потоком

Номер режиму	Знак електричного потенціалу			
fromep perking	пара	зразок		
0	0	заземлений		
ОП	0	заземлений		
0B	0	заземлений		
1B	Ð	заземлений		
2B	_	заземлений		
3B	Ð	Ð		
4B	Ð	_		
5B	-	_		
6B	_	Ð		

Розміри і форма зразків сталі наведені на рис. 2.28.



Рис. 2.28 Геометричні характеристики зразка лопаткової сталі

Електрична схема експерименту зображена на рис 2.29.



Рис. 2.29 Схема електрична режимів експерименту

Залежно від режиму дії парою зразок за допомогою електричного комутатора з'єднувався із землею (нульові режими і 1В, 2В) або підключався до високовольтного джерела. Зразки встановлювалися в потік за допомогою вузла кріплення (рис. 2.30).



Рис. 2.30 Вузол кріплення зразків

Після обробки парою в різних режимах було проведено вимірювання кількості поглиненого в зразках водню на установці «Скіф», а також визначена мікротвердість.

#### Методика визначення водню

Визначення розчиненого в зразках водню проводилося за методом термодесорбційної

спектроскопії. Цей метод є одним з найважливіших для вивчення взаємодії газів з металами. Детально метод описаний в роботах [84], [85], [86], а установка в [87]. Принципова схема термодесорбційної установки «СКІФ» зображена на рис. 2.31.



Рис. 2.31 Принципова схема установки «СКІФ»: І – прискорювальна секція; ІІ – секція вихідних пристроїв; 1 – джерело іонів; 2 – електростатична прискорювальна трубка; 3 — циліндр Фарадея з електромагнітним приводом; 4 – мас-сепаратор; 5,24 – вентилі; 6 – діафрагма; 7 – камера № 2; 8 – клапан ДУ-50; 9 –азотна пастка; 10, 21 – магніторозрядний насос НМД - 0.025; 11,15 – вікна; 12 – мішень; 13 – датчик мас-спектрометра АПДМ-1; 14 – ірисова діафрагма; 16 – кварцовий екран; 17 – датчик мас-спектрометра МХ-7304; 18 – лінза мас-спектрометричного аналізатора вторинних іонів; 19 – мас-сепаратор; 20 – ВЕУ; 22 – енергоаналізатор; 23 – камера № 1

Експерименти з вивчення термоактивованого газовиділення проводилися у вимірювальній камері № 1 установки. Досліджуваний зразок нагрівався за приблизно лінійним законом за допомогою електричного струму в діапазоні температур 80 ... 1800 К, а в окремих випадках (для контролю) – до плавлення зразка. Температура зразка вимірювалася за допомогою термопари. Парціальний тиск газів в аналітичній камері вимірювався монопольними мас-спектрометрами АПДМ-1 і МХ - 7304 в динамічному режимі. Реєстрація спектрів термодесорбції здійснювалася в абсолютних одиницях в двох координатних системах: p-t і p-T (де t і Т - час і температура нагріву). Одночасно здійснювалася реєстрація сигналів від зазначених двох мас-спектрометрів, вакуумметра і термопари за допомогою аналого-цифрового перетворювача WAD-AIK-BUS (4-канальний модуль аналогового введення з поканальною гальванічною розв'язкою на шину USB. Вхідний діапазон – напруга +/- 60мВ. Сигнали записувалися на ЕОМ у вигляді файла з розширенням "dat". Похибка вимірювань температури становила ± 5К. Сумарна кількість газу, що виділився під час нагрівання зі зразка, обробленого до заданої дози, визначалася за площею фігури, що лежить під кривою залежності швидкості десорбції газу з часом.

**Результати експериментів.** Загальний вигляд спектрів термодесорбції водню зі зразків сталі наведено на рис. 2.32.



Рис. 2.32 Спектри термодесорбції водню для різних режимів дії парою

Графіки спектрів: 1 – спектр зразка, не обробленого парою; 2 – спектр після дії перегрітою сухою парою; 3 – спектр після дії вологою нейтральною парою; 4 – спектр після дії негативно електризованою парою; 5 – спектр після дії позитивно електризованою парою.

У таблиці 2.10 наведено вміст водню і значення мікротвердості в зразках сталі.

жиму/ а	Поляр значення мі	оність і я струму, кА	Высоко напру	вольтна та, кВ	Мікротвердість H <sub>µ</sub> , кг/мм <sup>2</sup>		ть $H_{\mu}$ , кг/мм <sup>2</sup>	Кількість
иер ре	Зразок	Іоніза-	Іоніза-	Зразок	обробки, ч	наванта	ження, г	водню Н, ат. %
Hor	- F	тор	тор	- F		10	50	
0/0					6	101	175	0,4
	Перегріта (суха) пара							
0П/1					6	109	186	0,65
				]	Волога пара			
0B/2					6	98	185	0,65
1B/4	5,1	35	8,05		6	105	191	2,2
2B/3	-5,1	63	-8,3		6	98	175	4,0
5B/8	-70	-100	-6,7	-4,5	5	106	197	2,0
4B/9	-70	100	8,6	-4,5	5	118	212	0,15
3B/10	70	100	8,8	4,2	5	126	221	0,4
6B/11	70	-100	-8,8	3,5	5	115	211	1,75

Таблиця 2.10 Вміст водню і значення мікротвердості в зразках сталі 15X11МФ.

Гістограма в зразках сталі з найбільшою зміною вмісту водню після дії паровим потоком подана на рис. 2.33.



Рис. 2.33 Насичення зразків воднем в залежності від режиму дії пари: 0 – контрольний (не оброблений парою); 1 – пара суха перегріта нейтральна; 2 – волога пара нейтральна; 3 – волога пара негативно заряджена; 4 – волога пара позитивно заряджена

Аналіз результатів вмісту водню. Дані вимірювання розчиненого водню показують, що після дії парою найменше значення 0,4 ат. % відповідає нейтральним сухій перегрітій і волозій парі. Максимальне значення водню 4,0 ат. % у зразка, обробленого негативно іонізованою парою, менше значення 2,2 ат. % розчиненого водню у зразку, обробленому позитивно іонізованою парою, але все одно більш ніж в 5 разів чим у обробленого нейтральною парою.

Звертає на себе увагу факт, що найбільша концентрація розчиненого водню виявилася у зразка, обробленого негативно зарядженою парою. Цей факт означає, що спрощені модельні уявлення відносно електрохімічних процесів на поверхні метала під дією електризованої пари (коли пара вважається за катод, а поверхня метала за анод) не дозволяють пояснити експериментальний результат. Феномен наводнення негативно електризованою парою потребує подальшого вивчення. Цей парадокс знайшов відображення в науковій літературі, зокрема в статті [88] автори наводять дані про те, що водень може поглинатися металом в різних активних формах H + i H-.

Крім того в цьому експерименті не була виявлена однозначна залежність мікротвердості від концентрації поглиненого водню. Причиною цього могло бути протікання конкуруючих електрохімічних процесів на поверхні металу обумовлених махаон-електрохімічною дією вісокошвидкісного потоку пари в умовах контакту з атмосферним повітрям. Для більш ретельного вивчення характеру зміни мікротвердості була досліджена кінетика дії потоку позитивно електризованої пари протягом 11 годин з інтервалом в 1 годину.

# Дослідження кінетики зміни мікротвердості під дією зарядженого потоку пари.

Сталь 1X11МФШ. Початковий стан поверхні зразка і після дії потоком позитивно зарядженої пари протягом 11 годин наведено в таблицях 2.11 – 2.12.

Таблиця 2.11 Мікротвердість зразка №VI. Навантаження на індентор 10 г

Harran	Початковий стан поверхні		Після дії пари (1 год)	
номер вимірю- вання	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i></sub> , кг/мм <sup>2</sup>	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	${(H_{\mu})_i}^*, \ { m kg}/{ m Mm}^2$
1	10,23	177	12,98	110
2	10,34	173	12,98	110
3	10,89	156	13,64	100
4	10,12	181	12,98	110
5	9,9	189	13,75	98
6	10,34	173	12,98	110
7	10,89	156	12,65	116
8	11	153	12,87	112
9	10,89	156	12,87	112
10	13,09	108	14,19	92

### Продовження таблиці 2.11

Номер вимірю- вання	Після дії п	ари (2 год)	Після дії пари (2,7 год)	
	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i></sub> , кг/мм <sup>2</sup>	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	${(H_{\mu})_i}^*, \ { m kg}/{ m MM}^2$
1	13,42	103	13,31	105
2	15,84	74	14,08	94
3	13,64	100	11,11	150
4	12,76	114	11,0	153
5	14,3	91	11,88	131
6	14,52	88	12,65	116
7	12,54	118	11,77	134
8	13,86	97	12,43	120
9	13,97	95	13,31	105
10	12,98	110	11,99	129

## Продовження таблиці 2.11

Haven	Після дії п	ари (4 год)	Після дії пари (5 год)	
помер вимірю- вання	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i></sub> , кг/мм <sup>2</sup>	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i></sub> <sup>*</sup> , кг/мм <sup>2</sup>

1	17,16	63	15,84	74
2	13,97	95	13,86	97
3	14,3	91	19,36	50
4	13,09	108	16,94	65
5	12,76	114	17,6	60
6	19,8	47	16,72	66
7	19,14	51	13,2	106
8	12,43	120	15,84	74
9	13,09	108	17,6	60
10	14,52	88	13,42	103

### Продовження таблиці 2.11.

	Після дії пари (6 год)		Після дії пари (11 год)	
.Номер вимірю- вання	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i></sub> , кг/мм <sup>2</sup>	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	${(H_{\mu})_i}^*, \ { m kgmmmr}/{ m Mm}^2$
1	16,72	66	15,4	78
2	15,84	74	13,64	100
3	14,3	91	14,3	91
4	18,04	57	18,92	52
5	15,18	81	14,96	83
6	14,3	91	13,09	108
7	12,76	114	12,76	114
8	13,64	100	12,54	118
9	13,64	100	13,42	103
10	12,98	110	13,09	108

	ъ <i>с</i> .	•		30 371	TT	•		=0
	$\Lambda/11/n OTDO$	n IIIOTI	0000100	$N \cap V / I$	HODOUTONICOULIG	TTO 11	THAITON	5(1) T
1 a 0 J H U M Z . I Z		илсть	304384	JNY VI.	павантаження	на п	адентор	
		r —	-p	• ·= · =•			P	

Номер	Початковий стан поверхні		Після дії пари (1 год)		
вимірю-	Діагональ	$(H_{\mu})_i,$	Діагональ	$(H_{\mu})_{i}^{*},$	
вання	відбитка, <i>d</i> , мкм	кг/мм <sup>2</sup>	відбитка, <i>d</i> , мкм	кг/мм <sup>2</sup>	
1	20,68	217	21,23	206	
2	19,47	245	21,34	204	
3	20,24	226	21,01	210	
4	20,02	231	20,13	229	

5	20,24	226	21,56	199
6	20,46	221	21,34	204
7	21,01	210	20,57	219
8	20,46	221	20,9	212
9	20,68	217	20,35	224
10	20,24	226	20,9	212

# Продовження таблиці 2.12

II	Після дії пари (2 год)		Після дії пари (2,7 год)	
номер - вимірю- вання	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i>, кг/мм<sup>2</sup></sub>	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм
1	20,57	219	20,24	226
2	20,68	217	22,44	184
3	20,46	221	21,12	208
4	20,46	221	20,02	231
5	22,0	192	20,9	212
6	23,54	167	20,9	212
7	21,12	208	20,24	226
8	25,3	145	21,78	195
9	20,68	217	20,46	221
10	20,68	217	20,9	212

## Продовження таблиці 2.12

	Після дії п	ари (4 год)	Після дії пари (5 год)	
номер вимірю- вання	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i>, кг/мм<sup>2</sup></sub>	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм
1	20,24	226	23,98	161
2	21,12	208	24,2	158
3	22,88	177	24,64	153
4	22,66	181	25,74	140
5	25,08	147	24,86	150
6	24,42	155	24,86	150

7	21,56	199	23,54	167
8	20,9	212	22,0	192
9	22,88	177	22,0	192
10	23,32	170	24,42	155

#### Продовження таблиці 2.12

Номер вимірю- вання	Після дії п	ари (6 год)	Після дії пари (11 год)		
	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i></sub> , кг/мм <sup>2</sup>	відбитка, <i>d</i> , мкм	Діагональ відбитка, <i>d</i> , мкм	
1	21,34	204	23,98	161	
2	24,2	158	22,0	192	
3	20,68	217	20,68	217	
4	24,86	150	20,68	217	
5	21,56	199	21,23	206	
6	20,9	212	21,34	204	
7	20,9	212	20,68	217	
8	21,56	199	21,12	208	
9	22,0	192	20,24	226	
10	22,0	192	21,12	208	

Результати експерименту, наведені в табл. 2.13, показують, що позитивно заряджена пара призводить знеміцнюючу дію на поверхню лопаткової сталі.

Таблиця 2.13 Результат обробки даних експерименту з впливом позитивно зарядженої пари

Наван-			Час обробки, год						
тажен- ня, г	Контроль	1	2	2,7	4	5	6	11	Параметр
10	10,67	13,19	13,78	12,35	15,03	16,04	14,74	14,21	Середнє значення діагоналі, мкм
50	20,35	20,93	21,55	20,9	22,51	24,02	22,0	21,31	Середнє значення діагоналі, мкм
10	1,52	1,88	1,97	1,76	2,15	2,29	2,11	2,03	Середня глибина відбитку, мкм
50	2,91	2,99	3,08	2,99	3,22	3,43	3,14	3,04	Середня глибина відбитку, мкм
10	165,7	106,9	98,8	123,6	88,5	75,4	88,2	95,4	Η <sub>μ</sub> , кг/мм <sup>2</sup>

									середнє
50	224,1	211,8	202,4	212,9	185,4	161.8	193.5	205,4	$H_{\mu}$ , кг/мм <sup>2</sup>
	· · · ·	,	,	,	,	/	/	,	середнє
10		-30	-40	_12	-47	_/19	-47	_12	Відносна зміна
10		-30	-40	-42	-47	-47	-47	-42	$H_{\mu}$ , %
50		~	10	1.5	10	24	10	10	Відносна зміна
50		-5	-10	-15	-19	-24	-18	-12	$H_{\mu}$ , %

Найбільше знеміцнення понад 40% відбувається до глибини порядку 2 мкм, на глибині від 2 до 3,5 мкм зменшення мікротвердості майже в 2 рази менше. Графік кінетики зміни мікротвердості наведений на рис. 2.34.



Рис. 2.34 Відносна зміна мікротвердості зразка сталі 1Х11МФШ під час дії позитивно іонізованою парою: 1 – навантаження на індентор 10 г, 2 – навантаження на індентор 50 г

На графіку видно, що структурні і хімічні перетворення на поверхні лопаткової сталі найбільш активно протікають в перші 4 – 5 год дії зарядженим паровим потоком. У подальших дослідженнях цей інтервал часу дії паровим потоком був узятий за основу.

Оскільки процеси протікають в умовах контакту з атмосферним повітрям, найімовірніше, що за перші години обробки на поверхні утворюються плівки окислів та інших хімічних сполук, обумовлених контактом з атмосферними газами, а також хімічними домішками в парі.

2.6 Дослідження дії пари з різною електризацією на міцнісні властивості лопаткової сталі у вакуумованому стенді

Для наближення умов дії паровим потоком на експериментальній установці до умов в турбіні була проведена її модернізація. Загальний вигляд стенда після модернізації поданий на рис. 2.35.



Рис. 2.35 Загальний вигляд установки

Щоб зменшити домішки в парі, трубопровідну і запірну арматуру було замінено, де це можливо, на нержавіючу. Заново було виготовлено корпус котла з нержавіючої сталі, живлення котла переведено на дистильовану воду. Виготовлено вакуумовану проточну частину з герметичним кріпленням оброблюваних зразків. Виготовлено та встановлено конденсатор пари і систему рециркуляції конденсату. Стаціонарний режим роботи установки забезпечувався автоматичною системою стабілізації нагріву котла. Пара з парогенератора прискорювалася в конфузорнодифузорному соплі, використовуваному в попередніх експериментах. За зрізом сопла встановлювався оброблюваний зразок. Принципова схема експериментальної установки зображена на рис. 2.36.



Рис. 2.36 Схема модернізованої парової установки: 1 – джерело високої напруги; 2 – високовольтний ввід; 3 – іонізаційна камера котла; 4 – соплова частина з кріпленням зразка лопаткової сталі; 5 – проточна частина; 6 – датчики рівня води; 7 – пароперегрівач; 8 – котел; 9 – джерело живлення ТЕНів; 10 – підігрівач живильної води; 11 – живильний насос; 12 і 13 – буферні ємності; 14 і 15 – накопичувачі конденсату; 16 – конденсатор; 17 – вакуумний насос

Основні елементи і вузли стенда наведені на рис. 2.37 – 2.45.

На рис. 2.46 показано зовнішній вигляд системи бар'єрного розряду з проточною частиною і генератором живлення.



Рис. 2.37 Верхня частина котла з сопловим апаратом і робоча ділянка



Рис. 2.38 Проточна частина установки з соплом і розширювальною камерою



Рис. 2.39 Система контролю і керування установкою



Рис. 2.40 Двокорпусний основний конденсатор



Рис. 2.41 Вакуумний насос з системою осушення пари



Рис. 2.42 Сопло з іонізаційною камерою



Рис. 2.43 Вузол кріплення зразків з пружинним контактом



Рис. 2.44 Зовнішній вигляд проточної частини з модулем бар'єрного розряду



Рис. 2.45 Вузол кріплення зразків з пружинним контактом в модулі бар'єрного розряду



Рис. 2.46 Система бар'єрного розряду з проточною частиною і генератором живлення

Методика проведення досліджень. Основними задачами на модернізованій паровій установці були: дослідження процесів наводнювання лопаткової сталі під дією потоком іонізованої пари різної полярності; дослідження впливу пари на мікротвердість поверхні сталі за наявності електричного потенціалу на зразку або за його заземлення. На підставі графіка (рис. 2.34) було вибрано час обробки 4 год.

Перед початком експерименту з внутрішнього простору установки вакуумним насосом відкачувалося повітря до тиску не більше 20 кПа. Потім включався нагрів води в котлі. Включалися системи охолодження і термостатування теплообмінних пристроїв основного конденсатора пари і допоміжного конденсатора на вході вакуумного насоса. Конденсатор парової фази вакуумного насоса дозволяв за необхідності включати насос під час роботи котла. Нагрівання котла до початку паротворення проводилося у форсованому режимі, а потім нагрів переключався в режим автоматичного регулювання пароутворення, за рахунок стабілізації напруги живлення ТЕНів котла. Система реєстрації параметрів установки дозволяла контролювати такі параметри: температуру води живлення котла, температуру води в котлі, рівень води в котлі, температуру пари в котлі, тиск в котлі, температуру на вході в сопло, напругу і струм іонізатора, температуру на вході в конденсатор, температуру на вході і виході теплообмінника основного конденсатора. Також реєструвалися потенціал електризації зразка або струм короткого замикання зразка. За досягнення розрахункового перепаду тиску 50 кПа на сопловій ділянці швидкість пари на зрізі сопла була надзвуковою. Стенд працював в конденсаційному режимі за таких параметрів: тиск в конденсаторі ~20 кПа, тиск перед соплом ~70 кПа, швидкість пари в робочому режимі ~ 400 м/с. За соплом в скляній проточній частині візуально спостерігався туманний факел пари, що конденсувалася. Необхідні параметри парової установки підтримувалися на одному рівні протягом усього експерименту системою стабілізації.

Робоча ділянка стенда була виконана як роз'ємна трубна магістраль з вузлом кріплення зразків лопаткової сталі. Пара потрапляла в робочу ділянку через надзвукове сопло, на виході якого і встановлювався досліджуваний зразок зі сталі. Конструкція трубної магістралі дозволяла проводити швидку заміну випробовуваних зразків за рахунок фланцевих з'єднань.



Рис. 2.47 Схема установки зразка в потік пари

Вузол кріплення дозволяв реєструвати електризацію зразка або заземлити його на корпус установки за допомогою провідника, прикріпленого до затискача Схема кріплення зразка показана 2.47. В ході експериментів на рис. всі варіанти моделювали можливої полярності зарядів потоку і поверхні лопатки в реальній турбіні. Крім того,

оскільки в раніше проведених стендових експериментах було виявлено, що штучна іонізація пари в квазінейтральному режимі підвищує ефективність розширення переохолодженої пари на 2,5 %, було прийнято рішення провести дослідження дії і

квазінейтральної пари на міцнісні властивості поверхневого шару зразка лопаткової сталі.

Для обробки зразка квазінейтральною парою був розроблений і виготовлений трубчастий модуль бар'єрного розряду: схема розрядної камери модуля наведена на рис.2.48, (загальний вигляд на рис.2.44 – 2.45, вигляд системи бар'єрного розряду в сборі на рис.2.46).



Рис. 2.48 Схема розрядної камери модуля бар'єрного розряду

За геометричними характеристиками модуль був ідентичний трубчастій робочій ділянці, використаній в експериментах з коронною іонізацією потоку і встановлювався також, як і попередня робоча ділянка, між парогенератором і конденсатором.

Матеріал для експериментів був вирізаний із хвостової частини робочої лопатки ЦНТ турбіни (сталь 15Х11МФ). З цього фрагмента були нарізані та пронумеровані зразки з розмірами 10×4×1,2 мм. Їх поверхні були відполіровані відповідно до вимог для проведення досліджень мікротвердості і на них було виміряно початкове значення мікротвердості.

Зразок № V був контрольним і оброблявся нейтральною парою без включення іонізатора. Зразки №1, VI були оброблені негативно та позитивно зарядженою парою, а зразок №4 квазінейтральною парою.

Зразки обробляли протягом 3 годин за режимами наведеними в табл. 2.14.

	Полярність зарядженої пари	Іониз	затор	Зразок	
Номер зразку		Напруга, кВ	Струм коронного розряду, мА	Індукована потоком напруга, В	Струм короткого замикання на землю, мкА
1	негативна	- 7	75	712	0,2
VI	позитивна	+8,6	100	14,715,1	0,2
4	квазінейтральна (бар'єрний розряд).	3,2-3,4 частота 7,8 кГц,	~15	~24	0,1

Таблиця 2.14 Режими обробки ізольованих від землі зразків

**Результати експерименту зі швидкісним струменем пари у вакуумованій** системі. Результати вимірювання подані в табл. 2.15.

Таблиця 2.15 Вплив різних видів електризації парового потоку на зміну вмісту водню і величини мікротвердості після 4 год дії пари

Зразок №1 – обробка негативно зарядженою парою						
Навантаження	Початковий стан поверхні	Після дії пари	Відносна			
на індентор, г	$\mathrm{H}_{\mu}$ , кг/мм $^2$	${ m H}_{\mu}$ , кг/мм $^2$	зміна, %			
10	181,4	175,1	-3,5			
30	214,3	191,5	-10,6			
50	211,9	205,1	-3,2			
100	215,2	184,6	-14,2			
	Зразок № VI – обробка позит	гивно зарядженою парою				
Навантаження	Початковий стан поверхні	Після дії пари	Відносна			
на індентор, г	Η <sub>μ</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	Н <sub>µ</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	зміна, %			
10	230,9	157,2	-31,9			
30	251,4	207,7	-17,4			
50	244,4	232,0	-5,1			
100	242,3	233,7	-3,5			
	Зразок № V – обробка сухо	ю нейтральною парою				
Навантаження	Початковий стан поверхні	Після дії пари	Відносна			
на індентор, г	Η <sub>μ</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	Н <sub>µ</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	зміна, %			
10	160,0	158,4	-1,0			
30	198,7	180,6	-9,1			
50	194,8	189,9	-2,5			
100	212,5	197,5	-7,1			

**Вимірювання наводнювання зразків.** Результати дослідження наводнювання у вигляді спектрів термодесорбції у загальному вигляді зображено на рис. 2.49.



Рис. 2.49 Спектри термодесорбції зразків

Як видно на графіку, спектри термодесорбції мають різницю. суттєву Спектр контрольного зразка, який не зазнавав дії пари, знаходиться в діапазоні температур 600 ÷ 1100 К. Спектри всіх зразків, оброблених парою (як нейтральною, так 1 електризованою), мають більший температурний діапазон.

Найбільший температурний діапазон мають спектри зразків оброблених електризованою парою, крім того ці спектри мають і подібний вид кривих, з характерними відмінностями від спектрів контрольного зразка і обробленого нейтральною парою.

Величини площі під кривими термодесорбції для зразків, що зазнали негативної і позитивної дії електризованої пари, близькі за величиною, але площа під кривою для негативно електризованої пари трохи більше. Це означає, що наводнювання зразка лопаткової сталі після дії негативно електризованою парою більше, ніж позитивно електризованою.

Графіки зміни мікротвердості після дії нейтральною, позитивно і негативно електризованою парою зображені на рис. 2.50 – 2.52. На рис. 2.53 і таблиці 2.16 результати обробки зразка квазінейтральною парою.



Рис. 2.50 Залежність мікротвердості по глибині індентування до і після обробки нейтральною парою



Рис. 2.51 Залежність мікротвердості по глибині індентування до і після обробки позитивно електризованою парою



Рис. 2.52 Залежність мікротвердості по глибині індентування до і після обробки негативно електризованою парою



Рис. 2.53 Залежність мікротвердості по глибині індентування до і після обробки квазінейтральною парою

Зразок №4 – обробка квазінейтральною парою							
Навантаження	Вихідний стан	Після обробки	Відносна				
на індентор, г	Н <sub>μ</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	Н <sub>µ</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	зміна, %				
10	148,6	146,5	-1,4				
30	174,5	167,9	-3,8				
50	185,3	179,7	-3,0				
100	191,1	185,2	-3,1				

Таблиця 2.16 Результати дії квазінейтральною парою

Аналіз результатів. Чотиригодинна обробка негативно іонізованою парою не привела до значної зміни міцнісних властивостей поверхневого шару зразка сталі. Дія позитивно іонізованою парою істотно зменшила мікротвердість поверхневого шару. Суха нейтральна пара також зменшила мікротвердість, але на невелику величину – менше 10 %. Оскільки в цьому експерименті був незначний вплив повітря основною причиною змін властивостей поверхні, можна вважати дію заряджених крапель води, електричного поля парового струменя і іонів – продуктів дисоціації води. Очевидно, що немає прямого зв'язку між загальним наводнюванням і зміною міцнісних властивостей. Це пояснюється тим, що в експерименті не визначалась частка дифузійно-рухомого водню, внесок якого в знеміцнення є основним [88]. З огляду на те, що іонні струми в певних режимах іонізації парового потоку істотно впливають на міцнісні властивості поверхневого шару сталі, можна припустити, що в цих режимах зростає частка абсорбованого водню в дифузійнорухомому стані.

#### 2.7 Висновки по розділу 2

Інтерпретація даних стосовно аналогічних процесів в турбіні дозволяє зробити висновок про те, що в разі, коли турбіна працює з гарним вакуумуванням (низькою концентрацією повітря), іонний струм на поверхні проточної частини, обумовлений електризацією парового потоку, переважно складається з продуктів дисоціації води і іонів хімічних компонентів, що додаються в котлову воду. При цьому на металевих поверхнях проточної частини протікають електрохімічні процеси, подібні анодним і катодним, що може інтенсифікувати наводнювання і корозійні процеси [7]. Однак, на відміну від традиційних анодних і катодних процесів, в проточній частині можуть реалізовуватися процеси, за яких наводнювання поверхневого шару деталей проточної частини відбуватиметься навіть за негативної іонізації парового потоку і в більшій мірі, ніж за позитивної іонізації. Цей феномен вимагає подальшого вивчення. У науковій літературі про подібне явище є відомості дискусійного характеру [88]. Крім того, під час дії вологопаровим потоком на поверхню лопаткової сталі в будь-якому випадку (іонізований потік чи ні) в поверхневому шарі сталі зростає кількість водню. Цю обставину необхідно враховувати під час прогнозування робочого ресурсу турбіни.

Проведені експерименти щодо впливу потоку пари на поверхню лопаткової сталі показали, що заряджене дисперсне середовище має суттєву пошкоджувальну здатність по відношенню до поверхні лопаткової сталі [4]. Характер впливу зарядженого парового потоку залежить від швидкості зіткнення потоку з поверхнею сталі [6], знака заряду, газової атмосфери, в якій відбувається взаємодія, вихідного стану металевої поверхні та її електричного потенціалу. В умовах, подібних існуючим в проточній частині турбіни (в вакуумованій системі), найбільшу знеміцнювальну дію на поверхню металу має позитивно заряджений потік. Важливою особливістю впливу парового потоку на поверхню металу є загальне наводнювання, яке проявляється практично за всіх режимів обдування поверхні потоком. Найбільші кількості поглиненого водню були у заземлених зразків, що обдувалися парою, зарядженою як позитивно, так і негативно.

Знак заряду, як це обговорювалося під час аналізу попереднього експерименту, ймовірно, впливав не тільки на загальну концентрацію поглиненого в поверхневому шарі водню, але і на частку поглиненого водню в дифузійно-рухомій формі. Підставою для цього висновку є той факт, що у всіх проведених експериментах концентрація водню під час дії негативно електризованою парою більше, ніж позитивно електризованою [1]. В цілому дію електризованої вологої пари на лопаткову сталь можна охарактеризувати як негативну, що погіршує міцнісні властивості матеріалу. Однак найбільшу пошкоджувальну дію чинить позитивно електризована пара.

#### РОЗДІЛ З

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОСТІЙНОГО І ЗМІННОГО ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА МІКРОТВЕРДІСТЬ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЛОПАТКОВОЇ СТАЛІ

Постановка задачі дослідження. Наявність в робочому тілі вологопарової турбіни об'ємного заряду зумовлює появу в просторі проточної частини як постійних, так і змінних електричних полів. Ці поля можуть ініціювати різні електричні струми, а крім того, безпосередньо впливати на поверхні металевих деталей. Відомо, що вплив електричного поля на поверхню металу здатен змінювати міцнісні властивості поверхневого шару [89], [90], а також впливати на процеси 93]. деформації металу [91 — У зв'язку з ЦИМ актуальною £ задача експериментального дослідженя впливу електрічних полів на процес пластичного деформування поверехневого шару лопаткової сталі.

Для вибору величини напруженості поля на поверхні зразка в експерименті, була здійснена наближена оцінка напруженості поля в ЦНТ реальної турбіни між робочими та направляючими лопатками. Для розрахунку напруженості була обрана осереднена величина густини об'ємного заряду 10<sup>-6</sup> Кл/м<sup>3</sup>, експериментально визначена на натурній турбоустановці [33].

Для моделювання використовувалася програма ELCUT [94], [95]. Програма дозволяє моделювати фізичні поля методом скінченних елементів. Розрахунок був проведений у двовимірному наближенні. По результату розрахунку було отримано двувимірний розподіл напруженості електричного поля в міжлопатковому просторі в зоні вологої пари для густини об'ємного заряду 10<sup>-6</sup> Кл/м<sup>3</sup>, з відстанню між лопатками 170 мм і висотою лопатки 960 мм (рис 3.1).

На графічній моделі міжлопаткового зазору область об'ємного заряду задавалася у периферійній частині міжлопаткового зазору, де найбільша кількість крапельної вологи. Як видно з графіку, максимальна напруженість поля на поверхні лопатки в периферійній частині складає близько 7000 В/м.



Рис. 3.1 Розподіл великодисперсної зарядженої вологи по висоті лопатки і напруженості поля В / м між напрямними і робочими лопатками

3.1 Експериментальна установка для дії електричним полем на зразок сталі

Для проведення експерименту з дослідження впливу електричного поля на механічні властивості поверхні лопаткової сталі була зібрана випробувальна установка на базі приладу ПМТ-3 [2]. Загальний вигляд установки на рис.3.2. Схема підключення електричного потенціалу до зразка подібна схемам, наведеним в [96], [97]. Конструкція установки: на діелектричну основу була закріплена пластина фольгованого склотекстоліту, фольгою до діелектрика.

На пластину склотекстоліту зверху встановлювався досліджуваний зразок. До фольги і зразка припаяні провідники для подачі різниці потенціалів.



Рис. 3.2 Випробувальна установка

Джерелом різниці потенціалів був стабілізований лабораторний блок живлення Б5-47. Схема системи індентування в електричному полі зразка лопаткової сталі наведена на рис. 3.3.



Рис. 3.3 Система індентування в електричному полі: 1 – індентор; 2 – зразок; діелектрична основа

За потенціалу зразка 9 В розподіл напруженості поля на його поверхні має вигляд зображений на рис. 3.4.



Рис. 3.4 Діаграма напруженості поля на поверхні зразка лопаткової сталі

Числове значення напруженості на поверхні близько 8000 В/м, що близько до величини напруженості в проточній частині (див. рис. 3.1).

Модернізація мікротвердоміра ПМТ-3. Одним з важливих параметрів, що впливають на похибку вимірювання мікротвердості, є дотримання рекомендованого інструкцією приладу часового режиму плавного опускання індентора, витримки під навантаженням і плавного підйому індентора [78]. В інструкції ці параметри визначені приблизно в діапазоні 10 ÷ 15 с. Практично швидкість індентування на приладі ПМТ-3 визначається швидкістю повороту оператором рукоятки аретиру (рис 3.5).



Рис. 3.5 Загальний вигляд приладу ПМТ-3

Піл проведення час масових експериментів ручне керування навантаженням утомливо, і оператор може вносити В процес вимірювання 3 неконтрольовану помилку. метою зменшення впливу суб'єктивних факторів на результати вимірювань і полегшення оператора був розроблений роботи i виготовлений механізм повороту важеля аретира базі мікро-серводвигуна, на керованого мікропроцесорним модулем. Зовнішній вигляд електромеханічного

пристрою, змонтованого на приладі ПМТ-3, показаний на рис. 3.6. Система автоматичного повороту рукоятки аретира дозволяла ставити рекомендовані інструкцією часові інтервали навантаження, паузи і розвантаження з високою точністю і повторюваністю (до одиниць мілісекунд), що значно полегшувало процес вимірювань і мінімізувало похибку що могла бути внесена оператором.



Рис. 3.6 Електромеханічний вузол автоматичного механізму навантаження

#### 3.2 Методика експерименту

Для проведення експерименту були взяті зразки сталі 15Х11МФ розміром 10х5х1 мм. Зразок прикріплювався до поверхні пластини з одностороннього фольгованого склотекстоліту 85х20 мм, товщиною 1,5 мм на фольговану сторону за допомогою пластиліну. Для ізоляції всієї системи від корпусу приладу ПМТ-3 смуга фольгованого склотекстоліту стороною з фольгою приклеювалася до вініпластової пластини – основи 110х25 мм і завтовшки 2 мм. До фольги припаювався другий провідник. На зразок подавали позитивний потенціал, а на фольгу – негативний. Різниця потенціалів була 9 В. Схема механо-електричної дії на зразок в експерименті показана на рис. 3.7.


Рис. 3.7 Схема накладання поля і дії індентора на зразок сталі

Індентування проводилося за безпосереднього впливу електричного поля, на відміну від попередніх досліджень, в яких вивчалася післядія іонізованого потоку пари на механічні властивості поверхні. Однак електричне поле було накладено з протилежної індентуванню сторони, оскільки інакше це зробити було неможливо. Цей варіант накладання потенціалу відрізняється

від використаного в [96] і [97], оскільки досліджуваний зразок в цих експериментах містився зверху на один з електродів і електричне поле не було зосереджено між ним і другим електродом.

3.3 Результати експериментів

Експеримент №1. Обробка зразка постійним електричним полем 9 В. Результат вимірювання мікротвердості наведений в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 Результати вимірювань мікротвердості за дії постійним електричним полем

Номер	Початковий стан поверхні $\overline{H}_{\mu},$ кг/мм $^2$		$\overline{H}_{\mu}$ , кг/мм $^2$ під впливом поля 9 В			
вання	Навантаження, г					
	10 г	20 г	10 г	20 г		
1	162,8	181,3	162,8	147,8		
2	144,4	156,3	139,0	158,6		
3	153,2	156,3	147,3	143,8		
4	153,2	175,8	169,8	149,9		
5	141,6	181,3	144,4	145,8		
6	197,8	173,2	131,4	163,3		

7	150,2	158,6	124,4	165,7
8	162,8	184,1	129,0	130,9
9	153,2	175,8	117,9	
10	159,5	178,5	139,0	
$\overline{H}_{\mu}$	158	172	141	151

Мікротвердість поверхні зразка сталі істотно змінюється у разі підключення до нього постійного електричного потенціалу.

Відносна зміна мікротвердості

$$\varepsilon = rac{\overline{H_{\mu}^{\mathrm{n}}} - \overline{H_{\mu}}}{\overline{H_{\mu}}} \cdot 100 \ \%$$

склала для навантаження на індентор 10 г і 20 г:

$$\varepsilon_{10} = \frac{140,5 - 157,9}{157,9} \cdot 100 \% = -11 \%;$$

$$\varepsilon_{20} = \frac{150,7-172,1}{172,1} \cdot 100 \% = -12 \%$$

В експерименті під впливом змінного електричного полю напругою 6 В з частотою 1000 Гц, мікротвердість поверхневого шару зменшилася на 22 %.

Результати дослідження впливу на зразок електричного потенціалу 10 В різного знака, наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Результати впливу на зразок електричного потенціалу 10 В різного знака

Наванта	$\overline{H}_{\mu},$ кг/мм $^2$		Відносна	$\overline{H}_{\mu},$ кг/мм $^2$		Відносна
таванта ження, г	Без напруги	Під напругою +10 В	зміна є(H <sub>µ</sub> )	Без напруги	Під напругою –10 В	зміна є(H <sub>µ</sub> )
10	157,9	140,5	-11,0%	128,7	141,1	9,6%
20	172,2	150,7	-12,5%	154,5	156,8	1,5%

З результатів, наведених у табл. 3.2 видно, що електричне поле впливає на мікротвердість поверхні досліджених зразків зі сталі 15Х11МФ і характер цього впливу залежить від полярності електричного поля, яке наводиться на зразок.

Так, наприклад, за позитивного потенціалу мікротвердість зменшується на 11 .. 12%, а за негативного відбувається зворотний процес, і мікротвердість зростає на 9,6%. Такий вплив потенціалу на мікротвердість поверхні можна пояснити зміною питомої поверхневої енергії, обумовленої зміною поверхневої густини розподілу електронів.

Для перевірки цього припущення було досліджено вплив постійної напруги, регульованої в діапазоні від 0,2 до 12 В, і місця ідентування (рис. 3.8, позиції 5 і 6) на зміну мікротвердості поверхні. Для дослідження використовували зразок зі сталі 20Х13 з розмірами 50×18×12 мм. Схема і місця індентування показані на рис. 3.8. Результати відносної зміни мікротвердості, яка вимірювалася в зоні 5 (по центру поверхні зразка), наведені у вигляді графіків на рис. 3.9.



Рис. 3.8 Умовна схема вимірювання мікротвердості поверхні зразка, до бічної поверхні якого прикладено поляризуюче постійне електричне поле: 1 – зразок; 2 – діелектрична прокладка; 3 – мідний електрод; 4 – джерело напруги; 5, 6 – місця індентування



Рис. 3.9 Відносна зміна мікротвердості  $\varepsilon(H_{\mu})$  у зоні 5 за навантажень на індентор: 1 – 20 г; 2 –50 г; 3 –70 г; 4 – 100 г; 5 – 200 г; потенціал зразка позитивний

З рис. 3.9 видно, що характер і ступінь залежності зміни мікротвердості поверхні, виміряної в центральній частині зразка, від напруги на поверхні бічної грані носить складний поліекстремальний характер. При цьому амплітуда коливань залежить як від навантаження на індентор, так і від величини напруги. Зазначимо, що найбільші коливання спостерігаються під час зміни напруги в діапазоні від 0,2 до 3 В. За покрокового збільшення навантаження на індентор з 20 до 200 г ступінь впливу електричної напруги на відносну зміну мікротвердості поверхні знижується в 5 разів.

Так, наприклад, за напруги 1,5 В і навантаження на індентор 20 г відносна зміна мікротвердості  $\varepsilon(\overline{H}_{\mu})$  зі зростанням напруги поляризації коливається в межах від 34 % за U = 1 В до 54 % за U = 1,5 В, а за подальшого збільшення напруги амплітуда коливань зменшується і відносна зміна мікротвердості залишається в межах 43... 47 %. Зі збільшенням навантаження на індентор ступінь впливу напруги поляризації на відносну зміну мікротвердості поверхні  $\varepsilon(\overline{H}_{\mu})$  різко знижується, і за Р = 200 г відносна зміна коливається в межах від 2 до 10 % в діапазоні зміни напруги поляризації від 0,2 до 5 В, а з поступовим збільшенням до 12 В мікротвердість поверхні плавно прагне до початкового значення. Можна припустити, що така складна поліекстремальна зміна мікротвердості від напруги поляризації обумовлена декількома причинами. До них слід віднести перебіг декількох конкуруючих процесів, що протилежно впливають на процес пластичного деформування металу під час індентування (генерація дислокацій, їх переміщення, злиття і можлива анігіляція). Крім того, через детерміновану (квантовану) зміну енергетичного стану поверхневих електронів так само змінюється і питома поверхнева енергія металу, від якої залежить і генерація дислокацій, і енергія утворення нової поверхні. Оскільки зі збільшенням глибини проникнення за зростання навантаження на індентор ступінь впливу питомої поверхневої енергії на загальну роботу пластичного деформування поверхневого шару металу різко зменшується (обернено пропорційно глибині відбитка), то зменшується і її вплив на відносну зміну мікротвердості, що і спостерігається на графіках.

Для перевірки припущення щодо впливу знака напруги на характер зміни мікротвердості поверхні було проведено таке. Мікротвердість поверхні вимірювалася на відстані 15 – 20 мкм від краю бічної грані (рис. 3.8, місце індентування зона 6) за позитивного і негативного значень напруги. Значення напруги було обрано з графіка рис. 3.9 з умови його максимального впливу на мікротвердість, яка склала 1,5 В. Результати вимірювань у вигляді графіків наведені на рис. 3.10.

З графіків видно, що знак відносної зміни мікротвердості поверхні зворотний знаку полярності напруги на зразку. При цьому характер відносної зміни мікротвердості від навантаження на індентор носить поліекстремальний характер.

На нашу думку, це обумовлено складною еволюцією співвідношення таких конкуруючих явищ, як генерація, переміщення і взаємодія дислокацій і їх скупчень на фоні впливу енергетичного стану поверхні (Фермі енергії).



Рис. 3.10 Відносна зміна мікротвердості поверхні за негативної і позитивної поляризації зразка зі сталі 20Х13, виміряної за навантажень на індентор 10 г, 20 г, 30 г, 50 г, 70 г, 100 г, 150 г і 200 г: 1 – напруга U = –1,5 В; 2– напруга U = +1,5 В

За негативної напруги на зразку поверхнева густина електронів, а разом з нею і питома поверхнева енергія збільшується, що і приводить до зростання мікротвердості поверхні в порівнянні з її вихідним значенням (рис.3.10, крива 1), за позитивним потенціалом все відбувається навпаки, і мікротвердість зменшується (рис.3.10, крива 2). Таким чином, ми отримали непряме підтвердження наших припущень щодо кореляції зміни поверхневої густини електронів зі зміною мікротвердості металевої поверхні.

Раніше, під час проведення досліджень на ТЕЦ «Есхар» [32], було встановлено, що в ЦНТ в зоні електризації вологої пари виникають змінні електромагнітні поля в широкому діапазоні частот. У зв'язку з цим було досліджено вплив змінних електричних полів з частотами 20, 200, 2500 і 20000 Гц і напругою 10 В на мікротвердість поверхні призматичного зразка зі сталі 15Х11МФ. Мікротвердість визначали за трьох різних навантажень на індентор: 10, 20 і 100 г. Результати вимірювань у вигляді графіків наведені на рис. 3.11.



Рис. 3.11 Відносна зміна мікротвердості в залежності від частоти змінного електричного поля напругою 10 В при навантаженнях:

1 – 10 г; 2 – 20 г; 3 – 100 г

На графіках видно, що змінні електричні поля в діапазоні від 200 до 20000 Гц істотно впливають на пластичну деформацію поверхневого шару лопатки сталі 15Х11МФ. Найбільше відносне зниження мікротвердості спостерігається за навантажень на індентор 10 г до 30% і за навантажень на індентор 20 г до 18%. У разі збільшення навантаження на індентор до 100 г відносне зменшення мікротвердості поверхні лежить в діапазоні 5–10 %.

## 3.4 Висновки до розділу 3

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки: електричне поле, як постійне, так і змінне, що впливає на поверхню зразка лопаткової сталі, змінює мікротвердість за пластичної деформації. Максимальне зменшення мікротвердості в тонкому поверхневому шарі сталі може досягати величини порядку 30 %. Внаслідок цього за спільної дії ударів ерозійно-небезпечними краплями і електричним полем пошкодженість може виявитися вище, ніж в разі нейтральних крапель [2], [5].

Вплив позитивного потенціалу чинить знеміцнювальну дію на поверхню лопаткової сталі. Негативний потенціал впливає менше і приводить до збільшення мікротвердості. Найбільш негативним є вплив змінного електричного поля [3], проте він проявляється переважно в тонкому (порядку мікрометра) поверхневому шарі.

### РОЗДІЛ 4

## УТОЧНЕННЯ ФІЗИЧНИХ УЯВЛЕНЬ ПОШКОДЖУВАНОСТІ ПОВЕРХНІ ЛОПАТКОВОЇ СТАЛІ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЕФЯ

4.1 Врахування електрофізичних явищ при розгляді ерозійного процесу

В наслідок електризації робочого тіла вологопарової турбіни якісно змінюється процес ударної взаємодії крапель і металевих поверхонь, за рахунок електричного заряду на краплях і електричного поля в проточній частині ЦНТ. Механічна дія перетворюється в механо-електрофізичну, схему якої можна ілюструвати наступним чином (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 Схема взаємодії крапель і поверхні



До удару краплі поверхня металу знаходиться під впливом електричного полю об'ємного заряду потоку робочого тіла  $\vec{E}$ , крім того металева поверхня має електричний потенціал  $\varphi$ , величина якого може становити декілька вольт. Контакт краплі з поверхнею супроводжується електричним розрядом (іони, що утворюють

заряд краплі q, розряджаються на поверхню металу). Наступним етапом є розтікання краплі з механічним впливом на поверхню ї одночасним і руйнування проходженням супутніх електрохімічних реакцій. В наслідок цих процесів на поверхні робочої лопатки утворюються продукти реакції, що виносяться потоком робочого тіла, а також поглинаються металом лопатки. Найбільш важливим продуктом електрохімічних реакцій на поверхні лопаток є водень в іонному та атомарному стані. В результаті накопичення атомарного водню в поверхневому шарі металу може відбуватися утворення молекулярного водню по межі зерен, хімічні перетворення з утворенням гідриду металу, реакції зневуглецювання і т.д. що означає зменшення суцільності Ψ і збільшення пошкодження ω, тобто погіршення міцнісних властивостей. Для поверхні робочої лопатки накопичувана пошкодженість  $\omega$  буде функцією іонного струму  $I_j$ , часу впливу t і площі поверхні  $S_{l}$ , на яку потрапляють заряджені краплі, а також буде залежати від інтенсивності електрохімічних процесів обумовлених гальванопарами, впливом ЕФЯ та потенціалу поверхні  $\boldsymbol{\varphi}$ . Даний вид пошкодження є складовою загальної пошкодженості ю і його можна умовно назвати електрофізичним та подати у вигляді  $\omega_{\mathrm{E}\Phi\mathrm{S}} = f(I_i, t, S_l, E, \varphi) \; .$ 

В результаті механо-електричної дії заряджених крапель поверхневий шар лопаток більш інтенсивно набуває структурну і хімічну неоднорідність (гетерогенність) порівнянно з дією нейтральних крапель, яка є передвісником появи тріщин і пустот в матриці. З цієї точки зору гетерогенність поверхневого шару можна оцінювати як непряму міру суцільності  $\Psi$ . Кількісною непрямою оцінкою гетерогенності може бути статистичний коефіцієнт варіації мікротвердості поверхневого шару металу С<sub> $\nu$ </sub> [83] на деякій обраній площадці поверхні.

Цей підхід до визначення поняття суцільності і пошкодження відрізняється від сучасних моделей пошкодження [98], [99], [100]. Однак в сучасних моделях облік факторів різної природи, що впливають на пошкодженість може мати місце в неявній формі (у вигляді коефіцієнтів ерозійного пошкодження, або коефіцієнтів незнання). Так в універсальній математичній моделі ерозії [101] ерозійна пошкодженість в даній точці поверхні за час експозиції *t*<sub>э</sub> визначається як:

$$\int_{0}^{\omega} (1-\omega)^{k} d\omega = -\frac{1}{(k+1)} \int_{1}^{\Psi} \Psi^{k} d\Psi = 2\pi n t_{\mathfrak{I}} \int_{r_{k}}^{\infty} r dr \int_{0}^{t_{\mathcal{I}}} C[\sigma(r,t)]^{k} dt$$

де n - крапельне навантаження (кількість крапель, що випадає в одиницю часу на одиницю площі поверхні);

r - відстань від центру плями контакту;

r<sub>R</sub> - внутрішній радіус зони навантаження;

 $\Psi = 1 - \omega$  - параметр суцільності;

ω - параметр ерозійного пошкодження;

С, k - константи ерозійного пошкодження; σ - найбільша розтяжна напруга в даній точці;

 $t_{\rm d}$  - час дії навантаження від удару однієї краплі. Часова залежність  $\sigma(r,t)$ визначається умовою всередині інтервалу  $0 \le t \le t_{\rm d}$ , а просторова - законом загасання напруг уздовж осі оси r. При  $t = t_{\rm инк}$  відбувається руйнування, тобто  $\omega = 1, \Psi = 0.$ 

Інкубаційний період визначається у вигляді

$$t_{\text{инк}} = \frac{1}{2\pi(k+1)C} \left[ \sum_{i=1}^{i_{max}} n_i \frac{\sigma_{ki}^k d_{ki}^3 w_{Hi}^{,3}}{C_k^4} \left( \frac{A_R(k-1)(k-2)(2k-3) + A_{\text{CT}i}(k+1)(k-4)}{(k-1)(k-2)(2k-3)(k-4)} \right) \right]^{-1}$$

де  $d_k$  – діаметр і-ї краплі;

*w'<sub>Hi</sub>* – швидкість нормального зіткнення і-ї краплі;

 $\sigma_{Ri}$  – максимальне розтяжне зусилля в хвилі Релея від дії і-ї групи крапель в залежності від усередненого тиску на плямі контакту;

*А<sub>R</sub>*- динамічна константа;

*А*<sub>сті</sub> – статичний комплекс для і-ї групи крапель;

Як приклад працездатності наведеної універсальної математичної моделі [66] можна привести дані задовільного збігу теоретичної оцінки (після використання поправкових коефіцієнтів) та результатів обробки експериментальних даних з розвитку зон ерозійних ушкоджень останнього ступеня турбіни ТК-200 (Польща) в двох перерізах 0.784 і 0,588 довжини робочої лопатки останнього ступеня. На рисунку 4.1 показані кінетичні криві отримані за даними натурних випробувань і розрахунку.



Рис. 4.1 Ширина зони ерозійних пошкоджень вхідної кромки робочої лопатки турбіни 200 МВт: 1 і 2 - криві за даними натурних випробувань; 1 'і 2' – криві верифікації [66]

Як видно на малюнку, крива 1 істотно відрізняється від кривої 1', а крива 2 відрізняється від 2' в меншій мірі. Ця особливість кінетичних кривих з урахуванням ЕФЯ інтерпретується наступним чином. З натурних експериментів на турбінах відомо, що ступінь електризації парового потоку і відповідно електрофізичного впливу на лопатку найбільша в периферійній області. Оскільки електризація вологої пари та інтенсивність ЕФЯ для довжини 0,784 лопатки, суттєво більша ніж для довжини 0,588, відхилення кривої 1' від кривої 1 (крива 1' отримана у розрахунку без використання відповідних ЕФЯ коефіцієнтів) майже в два рази більше різниці між кривими 2 і 2'. В середньому перерізі лопатки електризація потоку незначна і в даному випадку розбіжність кривих 2 і 2' значно менше. Представлені дані дозволяють зробити висновок, що в разі нейтралізації парового потоку і нейтралізації ЕФЯ ерозійна пошкодженість може бути знижена приблизно в 2 рази.

4.2 Оціночний розрахунок поглинання водню ділянкою поверхні лопаткової сталі при наявності електричного заряду крапель

Для оціночного розрахунку впливу заряду крапель на наводнення лопаткової сталі в якості вихідних даних були взяті параметри, використані в теоретичному аналізі вкладу в наводнення лопаток останнього ступеня струму гальванопар, що виникають на поверхні лопаток [102]. В дослідженні [102] розглядається модель виникнення електричних струмів як результат впливу на поверхню нерозрахованих водно-хімічних режимів, структурної та хімічної гетерогенності поверхні та механічних пошкоджень поверхневого шару металу. В результаті проведених оціночних розрахунків автори статті прийшли до висновку, про незначний внесок розглянутих явищ в ерозію лопаток внаслідок низької гетерогенності поверхні, малої інтенсивності корозійних струмів від гальванопар, що утворюються на поверхні металу, та низької концентрації абсорбованого водню (близько 11 атомів на  $10^6$  атомів сталі або ~ 2×10<sup>-5</sup> мас. % за час  $t_c = 9 \cdot 10^5$  с, або 2500 год). Для оцінки небезпеки структурних і хімічних змін в поверхневому шарі лопаткового матеріалу автори роботи використовували експериментальні дані з джерела [103] для сталей 20К і 20ЮЧ. За цими даними необоротне водневе окрихчення має місце при концентраціях не менше  $2 \times 10^{-4}$  мас. % ( 100 атомів водню на  $10^{6}$  атомів сталі, або 100 ppm), що на порядок перевищує результат розрахунку.

Однак у випадку електризації парового потоку до водню, виробленому гальванопарами на поверхні лопатки, додається водень, що утворюється при замиканні іонного струму заряджених крапель на поверхню лопаток, а також водень, що утворюється електрохімічними процесами при диспергуванні вологи з поверхні і дії електричного поля. В результаті інтенсивність і складність електрохімічних процесів істотно зростає.

Зокрема механізм утворення водню у процесах виникнення і нейтралізації позитивно заряджених крапель крапель наведено у формулах (2.14 – 2.19). Утворення водню у процесах пов'язаних з виникненням і нейтралізацією негативно заряджених крапель можна представити таким чином:

негативна крапля

$$(H_2 0)_n \cdot z(0H^-)$$
 (4.1)

де z – кількість іонів, захоплених краплею.

При зіткненні негативно зарядженої частинки з заземленою поверхнею (анодом по відношенню до краплі) відбувається перехід електрона на анод з утворенням нейтральної гидроксогрупи (сильного окислювача)

$$OH^- - \bar{e} \to OH^0. \tag{4.2}$$

Гидроксогрупа на поверхні анода може вступити у взаємодію з атомом заліза в присутності плівки води з утворенням гідроксиду заліза і води

$$[Fe] + 20H^{0} \xrightarrow{H_20} Fe(0H)_2 + H_20.$$

$$(4.3)$$

Атомарний водень, що потрапляє на поверхню зразка, може рекомбінувати в молекулярний

$$2H^0 \to H_2. \tag{4.4}$$

Або вступати у взаємодію з атомами заліза на поверхні металу

$$H^0 + [Fe] \to [FeH]. \tag{4.5}$$

В результаті наведених реакцій на поверхні металу утворюється водень в іонній і атомарній формі, що є хімічно активною речовиною.

Кількість водню що утворюється, відповідно до закону Фарадея [104], визначається величиною іонного струму, часом протікання струму і електрохімічною константою транспортування іонів

$$m = \frac{M}{nF} It, \tag{4.6}$$

де *т* – маса речовини що утворюється, г;

*n* – кількість електронів які переносяться в електродному процесі;

F – число Фарадея (F = 96485 Кл/моль);

*I* – сила струму, А;

t - час, с;

М - молярна маса речовини що утворюється, г/моль.

З огляду на дані, наведені в статті [45], про величину заряду індивідуальної дрібної краплі, який може становити від 8 до 10 елементарних зарядів, а велика крапля несе ще більший заряд, можна зробити припущення, що в середньому одна крапля незалежно від розміру несе 10 іонів водню. З урахуванням даного допущення можна побудувати оціночні діаграми утворення водню на одиничній площадці поверхні металу. Для проведення попереднього розрахунку скористаємося



Рис. 4.2 Часова діаграма краплеударного навантаження; t<sub>y</sub> - час ударного навантаження, tп - час паузи між ударами

параметрами крапле-ударного навантаження [102]: модальні краплі в зоні останнього ступеня 50 мкм; час імпульсного навантаження  $(t_{\mu})$  10<sup>-6</sup> ÷ 10<sup>-8</sup> с; пауза між актами навантаження  $(t_{\pi})$  10<sup>-3</sup> ÷ 10<sup>-5</sup> с. Часова діаграма крапле-ударного навантаження наведена на рис. 4.2.

Відповідно сумарний час удару і паузи (період дії, Тв):

 $T_{\scriptscriptstyle \mathrm{B}} = t_{\scriptscriptstyle \mathrm{V}} + t_{\scriptscriptstyle \mathrm{II}}$ 

можна наближено оцінювати в діапазоні  $10^{-3} \div 10^{-5}$  с , оскільки  $t_{\mu} \ll t_{\pi}$ . Частота ударів (кількість крапель)

$$f = \frac{1}{T_{\rm B}}$$

буде  $10^3 \div 10^5$  за секунду. Для заряджених крапель такого розміру заряд становить ~ 10 елементарних зарядів. Площа поверхні, на яку буде розряджатися крапля істотно менше перерізу краплі по міделю, оскільки заряджена крапля деформується при наближенні до поверхні і іони концентруються в витягнутій до поверхні лопатки частини. З урахуванням цього приймемо вид одиничної площадки розряду краплі на поверхню лопатки у вигляді квадрата зі стороною рівною l = 10 мкм.

Мінімальний і максимальний іонний струм в секунду (для мінімальної і максимальної частоти ударів крапель):

$$I_{jmin} = 10 \times \bar{e} \times 10^3 \frac{i_{OHiB}}{c},$$
$$I_{jmax} = 10 \times \bar{e} \times 10^5 \frac{i_{OHiB}}{c},$$

де *ē* елементарний заряд (дорівнює заряду одного іона водню).

Відповідно кількість атомів водню N<sub>H</sub>, що утвориться на поверхні площадки в одиницю часу, приймемо рівною кількості іонів принесених краплями Nj. Для мінімального струму кількість іонів в функції від часу (в годинах)

$$N_{jmin}(t) = t \times 3.6 \times 10^7,$$

а для максимального струму

$$N_{jmax}(t) = t \times 3.6 \times 10^9$$

Кількість атомів одного шару металу  $N_{me}$  на поверхні обраної площадки, приймаючи період решітки рівним 0,4 нм

$$N_{me1} = \left(\frac{10 \times 10^{-6}}{0.4 \times 10^{-9}}\right)^2 \approx 6.25 \times 10^8$$
.

Оцінку збільшення вмісту водню проведемо для тонкого поверхневого шару близько 4 мкм. Для ділянки поверхневого шару з розмірами 10×10×4 мкм кількість атомів металу

$$N_{me} = 6,25 \times 10^8 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{0,4 \times 10^{-9}} \approx 6,25 \times 10^{12}$$

Припускаючи, що весь водень що утворюється поглинається в даній ділянці поверхневого шару, отримаємо кінетику збільшення вмісту водню в атомних відсотках для мінімального і максимального струму

$$C_{Hmin}(t) = \frac{N_{jmin}(t) \times 100}{6.25 \times 10^{12}} \text{ at. \%},$$
$$C_{Hmin}(t) = \frac{N_{jmax}(t) \times 100}{6.25 \times 10^{12}} \text{ at. \%}.$$

Графічний вид процесу тривалістю до 10 годин наведено на рис. 4.3.



Рис. 4.3 Кінетика насичення воднем протягом 10 год: 1 - максимальний струм (10<sup>6</sup> іонів/с); 2 - мінімальний струм (10<sup>4</sup> іонів/с); 3 - концентрація незворотньої водневої крихкості

На рисунку 4.3 видно, що порогова концентрація незворотньої водневої крихкості 0,01 ат. % (100 ppm) буде досягнута при максимальній інтенсивності іонного струму приблизно за 1 годину, а за мінімального струму приблизно за 10 годин. Отриманий результат суттєво відрізняється від наводнення струмом гальванопар, яке за час 2500 годин не досягає концентрації 0,01 ат. % (100 ppm).

Веріфікацію критичної концентрації водню в ~ 100 ррт можна провести по даним таблиці 1.2. Так для бандажного дроту X18H9T така концентрація приводила до його крихкого руйнування. Однак з огляду на відміну лопаткової сталі від сталі X18H9T по стійкості до водневого окрихчування, приймемо порогове значення незворотньої водневої крихкісті в поверхневому шарі лопаткової сталі в 10 разів більше –  $10^3$  ррт (0,1 ат. %). В такому випадку концентрацію водню в  $10^3$  ррт (0,1 ат. %) умовно можна вважати кінцевою концентрацією інкубаційного періоду. Досягається така концентрація в даному випадку при максимальному іонному струмі за час близько двох годин, а для мінімального струму час складе близько 200 годин. Кінетичні криві накопичення водню наведені на рис. 4.4 і рис.4.5.





Рис. 4.4 Кінетика насичення воднем за максимальним струмом



Реальна концентрація абсорбованого водню природно може відрізнятися плюс-мінус на порядок від отриманих оціночних величин, але тим не менше проведена оцінка дозволяє зробити якісні висновки про вплив зарядженості крапель на крапельно-ударну ерозію. Отримані в даному розрахунку величини часу можна вважати якісною оцінкою величини інкубаційного періоду, обумовленою електрофізичною компонентою пошкодження  $\omega_{E\Phi R}$ , що не залежить від кінетичної енергії крапель.

Чим менше іонний струм, ТИМ менше електрохімічна компонента пошкодження і інкубаційний період близький до величини обумовленої чисто механічною ударно-крапельною дією. Час, отриманий для мінімального іонного інкубаційного порядку близький часу періоду струму, по ДО реально спостережуваного на натурних турбінах.

Порівняємо отримані оцінки часу з результатами першого експерименту. За час 1,5 години на площадку розмірами 18х56 мм стікав позитивний іонний струм порядку 1мкА, перенесений потоком крапель із середнім діаметром 60 мкм, при низькій швидкості обдування, яка виключає механічне пошкодження оксидних плівок. При цих умовах негативну дію має переважно електрохімічний компонент. Оцінимо кількість іонів водню, принесених на всю поверхню за секунду при струмі 1 мкА (10<sup>-6</sup> А)

$$N_i = 6.25 \times 10^{18} \times 10^{-6} = 6.25 \times 10^{12}.$$

Загальна площа поверхні в мкм<sup>2</sup>

$$18 \times 10^3 \times 56 \times 10^3 = 1,008 \times 10^9$$
.

Знайдемо питому кількість іонів, що приходить на елементарну площадку 1х1 мкм за секунду

$$N_{is} = 6,2 \times 10^3$$

Для площадки  $10 \times 10$  мкм – 6,2 ×  $10^5$  шт. Ця кількість іонів відповідає потоку іонів з проведеного вище розрахунку для випадку максимальної частоти ударів крапель ( $10^5$  за секунду), тобто з максимальним іонним струмом  $I_{jmax}$ . За 1,5 години на елементарній площадці утвориться 0,1 атомних відсотків іонів водню від кількості атомів в площадці товщиною 4 мкм розглянутої вище. Ця кількість водню забезпечила істотне зниження мікротвердості (в 2 рази) і збільшення коефіцієнта варіації поверхневого шару на глибину близько Змкм. Отриманий результат можна інтерпретувати як досягнення концентрації незворотного окрихчування зразка з відповідним проявом деградації поверхневого шару механічних властивостей. Результат першого експерименту можна вважати обґрунтуванням вибору в якості мінімальної граничної концентрації абсорбованого водню для незворотної водневої крихкості лопаткової сталі величини 1000 ррт (0,1 at. %). 3 позиції оцінки інкубаційного процесу це етап його закінчення і накопичення структурних і хімічних змін поверхневого шару металу, які приведуть до його руйнування при механічному навантаженні.

### 4.3 Висновки по розділу 4

На даний момент, незважаючи на інтенсивні дослідження, воднева деградація все ще залишається невирішеною проблемою фізики металів, теоретичного і практичного матеріалознавства [105]. Відомо, що максимальний руйнівний вплив

водню спостерігається, коли водень має максимальну дифузійну рухливість і активність, тобто на стадії нестаціонарної дифузії [106]. Причому як зазначає автор [107] руйнування під впливом диффузійно-рухомого водню мало передбачувано і найбільш небезпечно внаслідок високої дифузійної рухливості водню і здатності перерозподілятися під впливом різних фізичних полів, а також існує невизначеність величини критичної концентрації водню в зоні руйнування. Оскільки при робочого тіла робочих електризації поверхня лопаток піддається дії електрофізичних явищ, з'являються умови для збільшення абсорбції водню металом, в тому числі в дифузійно-рухомій формі. Дані висновки про значний вплив на пошкоджуваність лопаток наводнення узгоджуються з висновками з публікації [108]. Виходячи з наведених вище якісних оцінок процесу впливу потоку вологої пари з зарядженими краплями на лопатковий матеріал, очевидно, що величина негативного впливу що припадає на електричні процеси залежить головним чином від величини іонного струму в просторі проточної частини. У свою чергу величина іонного струму залежить від кількості крапельної вологи, хімічного складу робочого матеріалу деталей проточної частини, наявності електричних полів, тіла. інтенсивності процесів електризації крапельної вологи. Крім того іонний струм є причиною появи об'ємного заряду в потоці робочого тіла і пов'язаного з ним власного електричного поля потоку, який надає додатковий вплив на міцнісні властивості поверхневого шару лопаткового матеріалу. Додатковий внесок в деградацію механічних властивостей поверхневого шару лопатки дає вплив електричного потенціалу і поля поверхні лопатки. Ці фактори впливу відсутні на ерозійних стендах і також як і електризація робочого тіла не беруться до уваги при проведенні проектно-конструкторських робіт.

Узагальнюючи отримані дані можна зробити висновок, що зміна властивостей робочого тіла як функціонального і ерозійного середовища в результаті електризації викликає істотне посилення (мінімум на порядок по відношенню до нейтральної вологої пари) електрохімічних процесів на поверхні робочих лопаток. В результаті змінюється кінетика накопичення пошкодженості поповерхневого шару металу за рахунок спільного протікання декількох негативних процесів: крапельно-ударної дії; електрохімічних процесів обумовлених механічною і структурно-хімічною неоднорідністю поверхні; абсорбції водню; зміни механічних властивостей під дією електричного поля. Причому найбільший внесок в зміни механічних властивостей дає абсорбція водню [1]. Комплексна негативна крапельно-ударна та електрофізична дія зменшує інкубаційний період та інтенсифікує ерозійний процес приблизно в два рази.

Викладені уявлення визначають загальний підхід до зменшення негативного впливу заряджених крапель на поверхню металевих деталей: необхідно організувати нейтралізацію іонного струму до контакту з металевими поверхнями, або радикальне зменшення крапельної вологи що контактує з поверхнями проточної частини, що збільшить ресурс лопаток приблизно в 2 рази.

### РОЗДІЛ 5

# ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЯВИЩ В РОБОЧОМУ ТІЛІ НА ПОВЕРХНЕВИЙ ШАР РОБОЧИХ ЛОПАТОК

5.1 Фізичні передумови для розробки рекомендацій

У разі електризації вологої пари у паровому потоці турбіни виникає проточна система транспорту іонів з супутніми електрофізичними явищами рис. 5.1.



Рис. 5.1 Система транспорту іонів в проточній частині

В даній системі у ролі електродів емітерів іонів виступають поверхні проточної частини з диспергованими з них плівками вологи. Результатом протікання іонного струму і електрофізичних явищ в проточній частині є електрохімічна пошкодженість поверхонь проточної частини. Найбільш небезпечний, з точки зору наводнення, позитивний іонний струм переносить найбільш небезпечна в ерозійному плані крупнодисперсна волога. В даному випадку у ерозійно-небезпечної вологи з'являється додатковий негативний фактор впливу на метал. З огляду на це найбільш ефективним методом боротьби зі негативною дією зарядженої ерозійно-небезпечною вологи є недопущення її контакту з поверхнями

робочих лопаток. Перспективним методом вирішення цього завдання є метод випарного вологовидалення.

У монографії [70] проведено огляд низки патентних рішень випарного вологовидалення таких фірм, як Rateau (обігрів гарячою водою через канали, виконані уздовж напрямних лопаток), Siemens AG (електричний обігрів лопаток), фірми CEM (гріюча пара подається в порожнисту лопатку через трубку, опущену майже до її кореня, а потім відсмоктується в конденсатор через отвір на периферії) і ряду інших авторів.

У 1996 році в ЦКТІ була розроблена система обігріву порожніх напрямних лопаток, в якій забезпечується повна конденсація гріючої пари в процесі теплообміну. В цьому випадку, завдяки використанню теплоти конденсації, витрата гріючої пари зменшується в кілька разів. Це технічне рішення було запатентовано колективом авторів з Харківського турбінного заводу і ЦКТІ [109]. Однак запропонований спосіб має ряд недоліків: неконтрольоване нагрівання лопаток, що не дозволяє нагрівати їх до оптимальної температури; не враховуються різні режими роботи турбіни, за яких оптимальна температура нагрівання лопаток різна. Немає діагностичного пристрою, що визначає наявність або відсутність крупнодисперсної вологи, що зривається з направляючих лопаток. Крім того існують режими роботи турбіни, на яких вологопаровий ступінь працює в перегрітому парі або зі зниженою вологістю. У цих випадках проводити нагрівання лопаток або немає необхідності, або його слід зменшувати, щоб не знижувати економічність турбіни.

На відміну від патента ЦКТІ, авторами ІПМаш був запропонований удосконалений варіант випарного вологовидалення з урахуванням електризації крапельної вологи в потоці [10].

5.2 Випарний спосіб видалення вологи з каналів направляючого апарата вологопарового турбінного ступеня з урахуванням її електризації

Спосіб запобігання утворенню крупнодисперсної вологи у вологопаровому турбінному ступені може бути використаний в потужних конденсаційних турбінах ТЕС і АЕС. Спосіб включає контрольоване нагрівання всіх лопаток до оптимальної температури, за допомогою сигналу електричного зонда (рис. 5.2), що залежить від режиму роботи турбіни і вмісту крупнодисперсної вологи в потоці пари за робочими лопатками ступеня, а також сигналу термопари встановленої на зовнішній поверхні одній з напрямних лопаток. Нагрівання лопаток здійснюється парою, взятою з

одного з попередніх вологопарових ступенів, спрямованою у внутрішні порожнини пустотілих лопаток направляючого апарата, а потім пара у вигляді конденсату або пароводяної суміші скидається через дренажний отвір 14 (рис. 5.3 б)), в конденсатор турбіни.

Регулювання витрати пари на нагрівання напрямних лопаток за сигналом зворотного зв'язку 3 електричного зонда дозволяє неефективність виключити використання пари i суттєво підвищити економічність системи вологовидалення.



Рис. 5.2 Електричний зонд випарної системи вологовидалення

Електричний зонд являє собою штировий електрод з підігрівним ізолятором, що встановлюється за останнім ступенем турбіни. Ерозійно-небезпечні краплі мають електричний заряд і при попаданні на зонд викликають електричний струм. Інтенсивність струмового сигналу залежить від наявності та кількості ерозійнонебезпечної вологи і дозволяє організувати систему зворотного зв'язку для керування нагрівом лопаток.

На рис. 5.3 наведені рисунки з патенту України № 113131 [10] що ілюструють технічне рішення.



Рис. 5.3 Схема випарної системи вологовидалення [10] а – поздовжній розріз турбінного ступеня і поперечний переріз лопатки направляючого апарата; б) схема течії пари, що гріє спрямовуючий апарат ступені і місце установки заглушок, що відокремлюють дренажні отвори від іншої частини порожнини в ободі направляючого апарата

На рис. 5.3, а) позиція 1 – електричний зонд, що реєструє зарядженість парового потоку; 2 – термопара контролю температури; на рис. 5.3, б) позиція 3 – дренажний отвір зліва і справа відокремлено від порожнини в ободі направляючого апарата заглушками 4, що дозволило забезпечити пропуск в лопатки однакової кількості нагрівної пари для нагрівання всіх лопаток до однієї температури, а також виключити наскрізну течію частини нагрівної пари повз лопатки в конденсатор.

Висока ефективність видалення вологи досягається за рахунок контрольованого нагрівання лопаток направляючого апарата до оптимальної температури, вимірюваної термопарою, встановленою на зовнішній поверхні лопатки. Оптимальна температура нагрівання залежить від режиму роботи турбіни і визначається за мінімальною кількістю крупнодисперсної вологи в потоці пари за робочими лопатками ступеня, виміряною за допомогою електричного зонда.

Для технічної реалізації нагріву лопаток можна застосувати АСК [110], структурна схема якої показана на рис.5.4.



Рис. 5.4 Структурна схема системи регулювання температури напрямних лопаток

Технічна реалізація такої системи пов'язана з вирішенням завдання розробки відповідної конструкції компактного регулятора подачі пари, який можна використовувати спільно з модернізованою діафрагмою останнього ступеня.

### 5.3 Метод зменшення зарядженості корекцією водно-хімічного режиму

Експериментальні дослідження залежності процесу утворення та накопичення об'ємного заряду парового потоку від водно-хімічного режиму, проведені на турбіні 750 кВт стенда МЕІ ЕТ-12, показали, що водно-хімічний режим впливає також і на інтенсивність електризації пари, і на електричну полярність її заряду [33]. Дослідження проводили при аміачному (ABP, pH = 9,3), нейтральному (HBP, pH = 8,2) і кисневому (КВР, pH = 8,2) водно-хімічних режимах.

На рис. 5.5 наведені діаграми залежності об'ємної густини зарядів від різних видів ВХР при ступені вологості Y ~ 1,5.



Рис. 5.5 Діаграма з монографії [33]: 1 – об'ємна густина зарядів;

2 – масова вологість пари

Як видно з діаграми, корекцією водно-хімічного режиму можна змінювати об'ємну густину зарядів (інтенсивність електризації парового потоку) більш ніж в 2 рази.

Подібна залежність була отримана на станції Новахо (рис. 5.6)



Рис. 5.6 Залежність електризації пари від ВХР

Технічна реалізація системи заглушення електризації корекцією ВХР може бути виконана на основі автоматизованої системи з використанням датчика електризації парового потоку.

5.4 Використання системи нейтралізації зарядів в потоці

Технічним рішенням, що мінімізує уніполярний об'ємний заряд в потоці робочого тіла в ЦНТ, може бути використання електродної системі нейтралізації

заряду робочого тіла, яку можна встановити за останнім ступенем турбіни. Зовнішній вигляд електродної системи нейтралізатора на рис. 5.7.



Рис. 5.7 Нейтралізатор

Ще способом ОДНИМ зменшення електризації € використання покриття направляючих лопаток, ЩО матеріалів, складається які 3 негативний дають знак електростатичного заряду диспергованої з них вологи. В такому разі зарядженість потоку буде подібна електризації після бар'єрного розряду, у якій, як було показано вище, електрохімічна златність пошкоджувальна подібна нейтральній парі.

### 5.5 Висновки по розділу 5

Розглянуті вище способи зменшення впливу електрофізичних явищ в турбіні на міцнісні властивості лопаткових матеріалів дозволяють комплексно вирішувати завдання захисту лопаток і збільшення їх робочого ресурсу [10], [11]. На підставі зроблених вище оцінок можна зробити висновок щодо збільшення інкубаційного періоду і загального терміну експлуатації лопаток в разі нейтралізації негативних факторів електрофізичних впливів приблизно в 2 рази.

#### ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлена і розв'язана науково-практична задача дослідження негативного впливу електризованої пари на робочі лопатки вологопарових турбін і запропоновані методи їх захисту. Дослідження спрямовано на підвищення ресурсу робочих лопаток вологопарових турбін в умовах виникнення в проточній частині електризації крапельної вологи і електрофізичних явищ.

Вирішення цього завдання дозволило отримати такі важливі наукові і практичні результати:

- 1 Експериментально встановлено, що при контакті лопаткових сталей з потоком вологої пари відбувається збільшення концентрації водню в металі незалежно від того, заряджений пар або електро-нейтральний. Однак в разі контакту з зарядженим паром концентрація сорбованого водню найбільша (в проведених експериментах зростає в 5 ÷ 10 разів і більше).
- 2 Встановлено, що вплив позитивно зарядженого потоку знижує міцнісні властивості поверхневого шару лопаткового матеріалу на 30 ÷ 50 %. Вплив потоку з негативним зарядом впливає незначно (до 7 %).
- 3 Експериментально встановлено, що переохолоджена штучно іонізована пара, що підвищує ефективність процесу розширення на 2,5 %, має незначний (до 7 %) вплив на мікротвердість поверхневого шару лопаткового матеріалу.
- 4 Встановлено, що робоче тіло як функціональне середовище істотно впливає на опір поверхневого шару лопаткового матеріалу механічній дії (зокрема, пластичній деформації).
- 5 Здійснено теоретичну оцінку накопичення водню в лопатковому матеріалі під час дії зарядженого парового потоку.
- 6 Наведено практичні рекомендації щодо зменшення ЕФЯ на міцнісні властивості поверхневого шару робочих лопаток турбін.
- 7 Встановлено, що мікротвердість поверхневого шару лопаткового матеріалу змінюється при впливі електричного поля. Залежно від величини і знака

електричного потенціалу на поверхні металу мікротвердість може збільшуватися або зменшуватися до 12 %.

- 8 За нерівномірного розподілу зарядженої крапельної вологи в проточній частині, а також при її прискореному русі виникає змінне електричне поле з частотою до 20 кГц. Встановлено, що дія змінного електричного поля в даному частотному діапазоні призводить до зміни мікротвердості поверхневого шару лопаткового матеріалу, а величина ефекту залежить від частоти. Максимальне зменшення мікротвердості в поверхневому шарі товщиною до 2 мкм може досягати 35 % в діапазоні частот f = 2,5 ÷ 20 кГц.
- 9 Отримані результати можуть бути корисні для вдосконалення фізичного моделювання та методології стендових випробувань на міцність і надійність лопаткових матеріалів шляхом урахування раніше невідомих електрофізичних факторів, встановлених в процесі даного дослідження..
- 10 Розроблено спосіб запобігання утворенню крупнодисперсної вологи у вологопаровому ступені і рекомендації щодо зниження негативного впливу зарядженої пари, що дозволяє виключити або істотно знизити інтенсивність електрофізичних явищ у вихлопній частині турбіни і збільшити ресурс робочих лопаток.

Отримані результати залежності мікротвердості лопаткових матеріалів від електрофізичного впливу електризованої пари є базовими матеріалом для розробки інноваційних технологій, що забезпечують збільшення експлуатаційної ефективності та надійності вологопарових турбін. Крім того, результати дослідження можуть бути використані в інших галузях промисловості.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажнопарового потока на поверхностную прочность материалов лопаток турбины // Termal Engineering. 2020. №1. С. 72–81.

2. Нечаев А. В. Экспериментальное исследование воздействия постоянного и переменного электрического поля на прочностные свойства поверхностного слоя лопаточной стали // Проблемы машиностроения. 2019. Т.22, №1. С. 4–7.

3. Тарелин А. А., Нечаев А. В., Хиневич А. Е. Электромагнитные излучения в выхлопной части паровой турбины // Проблемы машиностроения. 2017. Т.20, №2. С. 18–21.

4. Тарелин А. А., Орловский В. П., Ковалев А. С., Нечаев А. В. Расчетноэкспериментальные исследования влияния ионизации пара на параметры влажнопарового потока в сверхзвуковом сопле // Проблемы машиностроения. 2016. Т.19. №2, С. 3–10.

5. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажнопарового потока и электрических полей на изменение механических свойств материалов рабочих лопаток турбин // Вісник НТУ «ХПІ». Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 8. С. 107–115.

6. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние катодной поляризации стальной поверхности в парокапельном потоке на изменение ее микротвердости // Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические теплотехнические процессы и оборудование: 2013. № 14. С. 24–34.

7. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Электрофизические аспекты каплеударного разрушения элементов проточной части паровых турбин // Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические теплотехнические процессы и оборудование. 2012. № 7. С. 88–96.

 Зима И. И., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Магнитные эффекты в воде и их влияние на теплофизические свойства // Вестник Инженерной академии Украины.
 2010. №3–4. С. 178–183. 9. Зима И. И., Богданов Г. Ф., Нечаев А. В. Роторная спектроскопия потоков больших энергий // Вестник Харьк. политехн. ун-та. 1999. Вып.75. С. 93–97.

10. Спосіб запобігання утворенню великодисперсної вологи у вологопаровому турбінному ступеню / А. О Тарелін., В. П. Орловський, А. В Нечаєв. власник Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України. – № а 201512161; заявл. 08.12.2015; опубл. 12.12.15, Бюл. № 23. 5 с.

11. Нечаев А.В. Влияние электризованного влажнопарового потока на поверхностную прочность лопаток турбомашин // Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ-2019): Матеріали міжнар. наук.-техн. конф., (19 червня 2019 р., м. Харків). Х.: Харк. нац. ун-т імені В. Н. Каразіна. С. 51–52.

12. Anderson A. F. Sparks from steam. The story of Armstrong hydroelectric generator // Electronics & Power. 1978. Vol. 24. Iss. 1. P. 50–53.

Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству: в 2-х т.
 М.: Изд-во АН СССР, 1951. Т.2. 538 с.

14. Armstrong H.G. On the electricity of a jet of steam issuing from a boiler // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1840. Vol. 17. Iss. 111. P. 370–374.

15. Pattinson H.L. Experiments on the electricity of high-pressure steam // Там же. Р. 375–379.

16. Мучник В. М. Физика грозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 352 с.

17. Armstrong W. G. Description of a colossal hydroelectric machine, with a notice of some phenomena attending the production of electricity by steam // BA Report. 1845. Part 2. P. 30–31.

18. Курмакаев, В. М., Хоменок Л. А. Проблема электроэрозионных повреждений турбоагрегатов ТЭЦ, ГРЭС и АЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2011. №5. С. 30–33.

19. Грудинский П. Г., Лизунов Д. В. Зарядка роторов турбогенераторов паром // Электрические станции. 1935. №6. С. 12–23.

20. Лизунов Д. В. О механизме заряда паром роторов турбогенераторов // Электрические станции. 1936. №6. С. 31–33.

21. Лёб Л. Статическая электризация: пер. с англ. М.: Л.: Госэнергоиздат, 1963. 408 с.

Зацепина Г. Н. Физические свойства и структура воды. М.: МГУ, 1998.
 168 с.

23. Gruber J. M., Hansen E. F. Electrostatic Shaft Voltage on Steam-Turbine Rotors // J. Eng. Power. 1959. Vol. (1). P. 97–106.

24. Розенберг С. Ш., Сафонов Л. П., Хоменок Л. А. Исследование мощных паровых турбин на электростанциях. М.: Энергоатомиздат, 1994. 272 с.

25. Plazenet T., Boileau T., Caironi C. and Nahid-Mobarakeh B. An overview of shaft voltages and bearing currents in rotating machines 2016 // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Portland, OR, 2016, P. 1–8.

26. Бекряев В. И., Качурин Л. Г., Псаломщиков В. Ф. Электризация тел в потоке аэрозоля // Тр. Ленингр. гидрометеоролог. ин-та. Вопросы экспериментальной физики атмосферы. 1972. №45. С. 3–18.

27. Качурин Л. Г., Розенталь О. М. К построению теории электрического заряжения тел в потоке аэрозоля // Там же. С. 19–26.

28. Курячий А. П. Особенности электризации металлического тела, движущегося с большой скоростью в аэрозольной среде // Ученые записки Центр. аэрогидродинам. ин-та. 1983. Т.14. № 1. С. 48–56.

29. Шаффс У.З. К проблеме экзоэлектронной эмиссии // Экзоэлектронная эмиссия. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 306 с.

30. Ryley D. J., Loftus F. P. An investigation of electrostatic phenomena associated with flowing wet steam with particular reference to the wet steam turbine // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1980. Vol. 2. Iss. 2. P. 77–84.

31. Buckley, John Richard. A Study of heterogeneous nucleation and electrostatic charge in steam flows. Ph. D., thesis, University of Birmingham, 2003, 246 p.

32. Испытания турбоустановки Т-37/50-88 ТЭЦ-2 «Эсхар» с системой электрофизических воздействий в выхлопном отсеке турбины: отчет о НИР (окончательный): Ин-т пробл. машиностроения НАН Украины, Харьков, 1998, 96 с.

33. Тарелин А. А., Скляров В. П. Паровые турбины: электрофизические явления и неравновесные процессы: монография. СПб: Энерготех, 2012. 292 с.

34. Тарелин А. А., Скляров В. П., Крыженко В. П. Особенности измерения объемной плотности зарядов во влажном паровом потоке турбины // Проблемы машиностроения. 2000. Т.3, № 1. С. 11-16.

35. Семенов В. Н., Троицкий А. Н., Тарелин А. А., Скляров В. П., Дули Б. Р. Определение объемной плотности зарядов в потоке конденсирующегося пара при различных водно-химических режимах // Проблемы машиностроения. 2000. Т.3, № 3–4. С. 12–22.

36. Electrostatic Charge and its Influence on the Condensation of Steam in a Turbine, EPRI. Palo Alto, CA: 2001. 1001332 p.

37. Electrostatic charge measurements in the turbine - condenser connection of Salt River Project's Navajo Generating Station Unit 3, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1998. EPRI WO3849-01.

38. Тарелин А. А. Постфакторные явления электризации влажнопарового потока в турбинах // Теплоэнергетика. 2017. № 11. С. 32–39.

39. Тарелин А. А. Влияние температуры промежуточного перегрева на эффективность паровых турбоустановок ТЭС, работающих на переменных режимах // Теплоэнергетика. 2017. № 4. С. 65–71.

40. Тарелин А. А. Электризация влажнопарового потока и ее влияние на надежность и эффективность турбин // Теплоэнергетика. 2014. № 11. С. 21–29.

41. Тарелин А. А. Электрофизические аспекты в теории создания и эксплуатации паровых турбин // Доповіді НАН України. 2013. № 5. С. 87–94.

42. Тарелин А.А., Скляров В.П., Сурду Н.В. Электрофизические технологии применительно к тепловым энергоустановкам // Наука та інновації. 2008. Т.4, №6. С. 26–30.

43. Тарелин А. А., Скляров В.П. Влияние ионизации на процесс расширения водяного пара в сверхзвуковом сопле // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2000. № 4/5(40). С. 61–65.

44. Тарелин А.А., Скляров В.П., Орловский В.П. Влияние объемного заряда на величину переохлаждения парового потока за последней ступенью турбины // Проблемы машиностроения. 2004. Т.7, №1. С. 4–11.

45. Petr V. and Kolovratník M. Electrostatic Charge of Fine and Coarse Droplets in LP Steam Turbines // Proceedings of the 14th Intern. Conf. on the Properties of Water and Steam in Kyoto Japan, 2004. P. 606–611.

46. Шимони К. Теоретическая электротехника: под ред. В. Я. Фридмана. М.: Мир, 1964. 774 с.

47. Темников А. Г., Орлов А. В., Болотов В. Н., Ткач Ю. В. Исследование характеристик искрового разряда между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и землей // Инж.-физ. журн. 2005. Т. 75. № 7. С. 52–59.

48. Болотов В. Н., Ткач Ю. В. Спектральные характеристики искровых разрядов в искусственных заряженных аэрозольных образованиях // Электромагнитные Явления. Т.3. №2 (10). 2003. С. 236–255.

49. Зима И. И. Современная трактовка излучательной способности частиц, движущихся в естественных условиях геомагнитного поля // Прикладная радиоэлектроника. 2004. Т.З. №3. С. 73–78.

50. Зима И. И., Нечаев А. В., Богданов Г. Ф. Роторная спектроскопия потоков больших энергий // Вестник Харьк. гос. политехн. ун-та. 1999. №75. С. 93–97.

51. Зима И. И. Кавитационное возбуждение магнитных резонансов в жидких средах и живых тканях в условиях неопределенности напряженности геомагнитного поля // Прикладная радиоэлектроника. 2007. Вып. 3. С. 58–61.

52. Васильев Н. Д., Зима И. И. Магнитная роторная преддисоциация воды // Проблемы бионики. 2003. №59. С. 27–32.

53. Зима И. И., Нечаев А. В., Сурду Н. В., Жирнов В. В. Теплофизические аспекты резонансной магнитоакустической обработки воды // Экологическая и

техногенная безопасность: материалы XVIII междунар. науч.-техн. конф., (Бердянск, 2010). Харьков: УкрВОДГЕО, 2010. С. 157–164.

54. Зима И. И., Жирнов В. В., Переверзев Д. А. О возможности коррекции тепловых параметров воды В электростанциях путем резонансной // магнитоакустической обработки шумовыми сигналами Проблемы машиностроения. 2009. Т.12. №5. С. 53-56.

55. Орлова Д. В., Данилов В. И., Зуев Л. Б. Характер изменения микротвердости плоскости (0001) монокристаллов Zn под действием электростатического поля и возможная причина этого эффекта // Физика твердого тела. 2013. Т.55. Вып. 2. С. 313–317.

56. Данилов В. И., Зуев Л. Б., Коновалов С. В., Филипьев Р. А., Семухин Б. С. О влиянии электрического потенциала на сопротивление микроиндентированию поверхности металлов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. №2. С. 85–89.

57. Орлова Д. В., Данилов В. И., Зуев Л. Б., Стаскевич О. С. Влияние малых электрических потенциалов на микротвердость металлических материалов // Физика твердого тела. 2016. Т.58. Вып.1. С. 11–13.

58. Невский С. А., Коновалов С. В., Громов В. Е. Влияние электрического потенциала поверхности алюминия на процесс релаксации напряжений // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. Вып. 6. С. 133–136.

59. Коновалов С. В. Закономерности влияния электромагнитных полей и токов на пластичность металлов и сплавов: дис. ... д-ра техн. наук / Сибирский государств. индустр. ун-т. Новокузнецк, 2013. 294 с.

60. Шубенко А. Л. Ковальский А. Э. Каплеударная эрозия лопаточных аппаратов паровых турбин. Прогнозирование и методы защиты // Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. 2012. № 7. С. 76–87.

61. Варавка В. Н. Исследования в области каплеударной эрозии энергетического оборудования: ретроспективный обзор и анализ текущего
состояния // Вестник Донского государств. техн. ун-та. 2016. Т.16. №1(84). С. 67—76.

62. Кудряков О. В. Механизмы и закономерности деградации поверхности стали на стадиях развитой каплеударной эрозии // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. №2. С. 100–112.

63. Фаддеев И. П. Эрозия влажнопаровых турбин. Л.: Машиностроение, 1974. 206 с.

64. Баулин В. И., Перельман Р. Г. Волны Релея как один из ведущих факторов в капельно-ударном разрушении деталей // Проблемы прочности. 1974. №1. С. 65–69.

65. Перельман Р. Г., Пряхин В. В. Эрозия элементов паровых турбин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с.

66. Шубенко А. Л. Математическое моделирование процессов течения влажного пара и оценка их воздействия на характеристики проточных частей турбин: дис. ... д-ра техн. наук / Ин-т пробл. машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины. Харьков, 1994. 265 с.

67. Шубенко А. Л., Ковальский А. Э., Воробьев Ю. С. и др. Влияние эрозии на основные эксплуатационные характеристики рабочей лопатки последней ступени цилиндра низкого давления мощной паровой турбины // Проблемы машиностроения. 2010. Т.13. № 1. С. 3–11.

68. Ковальский А. Э. Теоретическое обоснование механизма каплеударной эрозии рабочих лопаток осевых турбомашин // Авіац.-косм. техніка і технологія. Двигуни та енергоустановки: зб. наук. пр. Х.: Нац. аерокосмічний ун-т «ХАІ». 2001. Вип. 23. С. 33–41.

69. Ковальский А. Э. Развитие теории каплеударной эрозии и создание эффективной противоэрозионной защиты рабочих лопаток паровых турбин: дис. ...д-ра техн. наук. Харьков, 2007. 377 с.

70. Качуринер Ю. Я. Паровые турбины: особенности работы влажнопаровых ступеней. СПб: Энерготех, 2015. 216 с.

71. Петров Л. Н., Сопрунюк Н. Г. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов. Киев: Наук. думка, 1991. 216 с.

72. Краснов К. С., Воробьев Н. К., Годнев И. Н. и др. Физическая химия: в 2-х кн. Кн. 2. Электрохимия. Химическая кинетика и катализ: учеб. для вузов / под ред. К. С. Краснова; 3-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2001. 319 с.

73. Савельев И.В. Курс общей физики: в 2-х т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: учеб. пособие; 2-е изд., перераб. М.: Наука. 1982. 496 с.

74. Сивухин Д. В. Общий курс физики: в 3-х т. Т. III. Электричество; изд. 4е, стереотип. М.: Физматлит; 2004. 656 с.

75. Улиг Г. Г., Реви Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Л.: Химия, 1989. 1985. 456 с.

76. Гончарова И.В. Определение методом индентирования физикомеханических свойств материалов с разной кристаллической структурой: дис. ... канд. физ-мат наук /Ин-т. пробл. материаловедения. Киев, 2017. 171 с.

77. Федосов С. А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: Современные зарубежные методики. М: Физический факультет МГУ, 2004. 100 с.

78. Харитонов Л. Г. Определение микротвердости, М.: Металлургия, 1967, 48 с.

79. ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Издательство стандартов, 1993. 35 с.

80. Микротвердость материалов; Методические указания к лабораторной работе / Сост. Паршев С. Н., Полозенко Н. Ю. / Волгоградский государств. технич. ун-т. Волгоград. 2004. 15 с.

81. Якименко Л. М., Модылевская И. Д., Ткачек З. А. Электролиз воды. М.: Химия, 1970, 264 с.

82. Физика. Практическая обработка экспериментальных данных: метод. указания / сост.: В. Д. Агапьев, В. В. Козловский. - СПб.: Политехн. ун-т, 2012. 61 с.

83. Лакин Г. Ф. Биометрия: Учеб. пособие для биол. спец. вузов, 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1990. 352 с.

84. Зенгуил Э. Физика поверхности: пер. с англ. / под ред. В. Ф. Киселева.М.: Мир, 1990. 536 с.

85. Redhead P. A. Thermal desorption of gases // Vacuum. 1962. Vol.12. P. 203–211.

86. Войт А. П. Термодесорбционные исследования разложения гидридов металлов: дис. канд. физ.-мат. наук / С-Петербург. ун-т. Спб, 2005. 105 с.

87. Ружицкий В. В., Грибанов Ю. А., Рыбалко В. Ф., Хазан С. М., Морозов А. Н., Мартынов И. С. Многоцелевая экспериментальная установка «СКИФ» // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». 1989. Вып. 4/51. С. 84–89.

88. Сошко В. А., Симинченко И. П., Ляшков В. С. Водородная хрупкость и водородная пластичность стали // Металлофизика и новейшие технологии. 2014. Т.
36. №12. С. 1701–1710.

89. Орлова Д. В., Филипьев Р. А., Данилов В. И. О возможных причинах влияния электрического потенциала на сопротивление металлов микроиндентированию // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. Т. 55(10). С. 66–67.

90. Орлова Д. В. О влиянии электростатического поля на микротвердость монокристаллов цинка [и др.] // Обработка металлов. 2012. № 4. С. 98–102.

91. Хон Ю. А., Каминский П. П., Зуев Л. Б. О влиянии электрического потенциала на пластическую деформацию проводников // Физика твердого тела. 2013. Т.55, вып. 6. С.1047–1051.

92. Клыпин А. А. О пластической деформации металлов при наличии электрического воздействия // Пробл. прочности. 1975. № 7. С. 20–25.

93. Клыпин А. А. Свойства металлических материалов при наличии внешнего энергетического воздействия // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т.10. №3. С.424–429.

94. Черных И. В. Решение полевых задач с помощью программы ELCUT 4.2: Методические указания по дисциплине Методы расчета электрических и магнитных полей. Екатеринбург: Урал. техн. ун-т – Урал. политехн. ин-т, 2005. 24 с.

95. Арбузов В.Н. Применение комплекса программ ELCUT для решения задач электростатики. Пособие для студентов заочной формы обучения по специальности 140211 Электроснабжение. М.: Московский ин-т энергобезопасности и энергосбережения. 2008. 27 с.

96. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Коновалов С. В. и др. О влиянии контактной разности потенциалов и электрического потенциала на микротвердость металлов // Физика твердого тела. 2009. Т. 51. Вып. 6. С. 1077–1080.

97. Волегов П. С., Грибов Д. С., Трусов П. В. Поврежденность и разрушение: обзор экспериментальных работ // Физ. мезомех. 2015. Т.18. № 3. С. 11–24.

98. Сосновский Л. А., Щербаков С. С. Концепции поврежденности материалов // Вісник Тернопільського нац. техніч. ун-ту. 2011. Ч.1. С. 14–23.

99. Качанов, Л.М. Основы механики разрушения [Текст] / Л.М. Качанов. – М., 1974. – 311 с.

100. Шубенко А. Л., Ковальский А. Э., Стрельников И. С., Шевякова И. Н. Оценка влияния наводораживания и коррозионных сред на процесс каплеударной эрозии элементов проточной части цилиндров низкого давления паровых турбин // Проблемы машиностроения. 1998. Т.1. № 3–4. С. 9–15.

101. Мирошник В. Л., Океанко А. П., Саррак В. И. Зарождение трещин разрушения в ферритно-перлитных сталях в присутствии водорода // Физикохимическая механика материалов. 1984. № 3. С. 73–78.

102. Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Справочник по физике для инженеров и студентов. М.: Оникс, 2006. 1056 с.

103. Ткачов В. І. Проблеми водневої деградації металів // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2000. № 4. С. 7–14.

104. Шашкова Л. В. Фрактально-синергетические аспекты локальной микроповреждаемости и разрушения диффузионно-активированной водородом стали: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Оренбургский гос. ун-т. М., 2014. 336 с.

105. Колачев. Б. А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 216 с. 106. Селянский А.С. Ударная эрозия рабочих лопаток цилиндра низкого давления // Вісник нац. техн. ун-ту України «Київський політехнічний інститут». Сер. Машинобудування. 2008. Вип. 55. С. 37–42.

107. Плетнев Г. П., Долинин И. В. Основы построения и функционирования АСУ тепловых электростанций. М.: Моск. энерг.ин-т, 2000. 352 с.

### ДОДАТОК А



Ten + 38 (057) 349-22-85, 349-22-92, 349-26-54 факсi + 38 (057) 349-21-71, 349-21-95, 349-20-62 e-mail office/@turboatom.com.ua, www.turboatom.com.ua subctit C1 C6 LCLL № CL - L16

Hartef No.

Moskovsky ave. 199, Kharkiv, 61037, Ukraine tel.+ 38 (057) 349-22-85, 349-22-92, 349-26-54 fax.+ 38 (057) 349-21-71, 349-21-95, 349-20-62 e-mail.office@turboatom.com.ua, www.turboatom.com.ua

Довідка про впровадження результатів кандидатської дисертації

Нечаєва Андрія Вікторовича

Одержані Нечаєвим А.В. експериментальні результати по дослідженню негативного впливу електризованої пари та електрофізичних явищ на робочі лопатки волого-парових турбін отримані вперше і мають важливе значення для розробки методів підвищення надійності турбоагрегатів.

Запропоновані в дисертації методи захисту робочих лопаток будуть використані під час розробки перспективних вдосконалених конструкцій циліндрів низького тиску волого-парових турбін.

Генеральний конструктор

Alt €.В. Левченко

#### ДОДАТОК Б

# СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажнопарового потока на поверхностную прочность материалов лопаток турбины // Termal Engineering. 2020. №1. С. 72–81.

2. Нечаев А. В. Экспериментальное исследование воздействия постоянного и переменного электрического поля на прочностные свойства поверхностного слоя лопаточной стали. // Проблемы машиностроения. 2019. Т.22. №1. С. 4–7.

3. Тарелин А. А., Нечаев А. В., Хиневич А. Е. Электромагнитные излучения в выхлопной части паровой турбины // Проблемы машиностроения. 2017. Т.20, №2. С. 18–21.

4. Тарелин А. А., Орловский В. П., Ковалев А. С., Нечаев А. В. Расчетноэкспериментальные исследования влияния ионизации пара на параметры влажнопарового потока в сверхзвуковом сопле // Проблемы машиностроения. 2016. Т.19. №2. С. 3–10.

5. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажнопарового потока и электрических полей на изменение механических свойств материалов рабочих лопаток турбин // Вісник НТУ «ХПІ». Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 8. С. 107–115.

6. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние катодной поляризации стальной поверхности в парокапельном потоке на изменение ее микротвердости // Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические теплотехнические процессы и оборудование: 2013. № 14. С. 24–34.

7. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Электрофизические аспекты каплеударного разрушения элементов проточной части паровых турбин // Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические теплотехнические процессы и оборудование. 2012. № 7. С. 88–96.

 8. Зима И. И., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Магнитные эффекты в воде и их влияние на теплофизические свойства // Вестник Инженерной академии Украины.
 2010. №3–4. С. 178–183.

9. Зима И. И., Богданов Г. Ф., Нечаев А. В. Роторная спектроскопия потоков больших энергий // Вестник Харьк. политехн. ун-та. 1999. Вып.75. С. 93–97.

 Спосіб запобігання утворенню великодисперсної вологи у волого-паровому турбінному ступеню: пат. 113131 України / А. О. Тарелін, В. П. Орловський, А. В. Нечаєв № а201612161; заявл. 08.12.2015; опубл. 12.12.2016, Бюл. №23. 4 с.

11. Нечаев А. В. Влияние электризованного влажнопарового потока на поверхностную прочность лопаток турбомашин // Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ-2019): Матеріали міжнар. наук.техн. конф., (19 червня 2019 р., м. Харків). Х.: Харк. нац. ун-т імені В. Н. Каразіна. С. 51–52.

## ДОДАТОК В

### ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на:

- міжнародній науково-технічної конференції «Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення 2019 (ФТПЕШВ-2019)» (Харків, 2019, доповідь);
- XVI міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалювання енергоустановок методами математичного та фізичного моделювання» (Харків, 2017, доповідь);
- XII міжнародній науково-технічній конференції НТУ XIII «Енергетичні та теплотехнічні процеси і устаткування» (Харків, 2016, доповідь);
- XV міжнародній науковій конференції «Удосконалювання енергоустановок методами математичного та фізичного моделювання» (Харківська обл., с. Задонецьке, Зміївський р-н, 2015, доповідь);
- IX міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення» (Харків, 2013, доповідь).