

УДК 621.165.62-192  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/28>

**Беднарська І.С.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Риндюк Д.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТОПОРНО-РЕГУЛЮЮЧОГО КЛАПАНА АЕС З УРАХУВАННЯМ ГАЗОДИНАМІКИ РОБОЧОГО ТІЛА

*Стаття присвячена розробці методики визначення теплового та напружено-деформованого стану стопорно-регулюючого клапана атомної електростанції, що базується на заміні трудомісткого процесу розрахунку граничних умов теплообміну моделюванням газодинаміки течії вологої пари. В даній роботі розглянуто газодинамічні процеси та напружено-деформований стан стопорно-регулюючого клапана системи паророзподілу Хмельницької атомної електростанції (ХАЕС) енергоблоку № 2 від парогенератора № 2. В результаті виконаного моделювання процесу течії вологої пари в стопорно-регулюючому клапані на енергоблоці № 2 Хмельницької АЕС отримані дані щодо розподілу тисків, температур і швидкостей робочого тіла. Розглянуто особливості протікання пари в стопорно-регулюючому клапані та особливості утворення вихорів в проточному тракті клапана, їх вплив на внутрішні стінки клапана. Проведено аналіз впливу температури та тиску пари на внутрішні стінки регулюючого клапана. Представлений спосіб числових досліджень дає можливість провести більш повний аналіз досліджуваного об'єкта, а саме провести комплекс числових експериментів по визначенню газодинаміки клапана з можливістю визначення наявних напружень та завчасного прогнозування пошкоджень в конструкції клапана. Проведено комплекс числових експериментів по дослідженню напружено-деформованого стану корпусу клапана. Визначено наявні напруження в корпусі стопорно-регулюючого клапана енергоблоку № 2 ХАЕС від ПГ № 2. Відзначено, що за рахунок виникнення вихорів у вихідній проточній частині клапана відбуваються циклічні флуктуації тиску у пристінковій зоні, що в свою чергу викликає прискорення циклічної пошкоджуваності металу корпусу у відповідних місцях. У подальшому отримані дані можуть будуть використані для визначення залишкового ресурсу головних паропроводів АЕС.*

**Ключові слова:** атомна енергетика, клапан, газодинаміка, математичне моделювання.

**Постановка проблеми.** Для України атомна енергетика є стратегічно важливою частиною енергопостачання: її поточний і прогнозований внесок становить близько 50% виробництва електроенергії в країні. Вона займає одну з провідних позицій в українській економіці та забезпечує важливу сферу національної безпеки – атомну енергетику. Тобто успішне функціонування атомної енергетики є однією з необхідних умов національної безпеки [1].

Атомна енергетика є основним заміником викопного палива (вугілля, нафта, природний газ) у сфері виробництва електроенергії, а також є основним способом скорочення викидів вуглекислого газу і тим самим зменшення парникового ефекту [1]. Згідно з прогнозом МАГАТЕ, встановлена потужність світового парку атомних електростанцій у 2030 році досягне 500 ГВт

за мінімальним сценарієм розвитку та 746 ГВт за максимального. Згідно з останнім прогнозом Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), частка ядерної енергетики в задоволенні попиту на первинну енергію значно зросте.

Нині розвинені країни Азії, Європи та Америки вкладають значні кошти в розвиток атомної енергетики, щоб щороку вводити в експлуатацію десятки ядерних реакторів. З 14 148 МВт встановлених АЕС Україна посідає сьоме місце у світі. На Запорізькій, Рівненській, Південноукраїнській та Хмельницькій АЕС працюють 16 енергоблоків, 14 типу ВВЕР-1000 і 2 типу ВВЕР-440. Атомна енергетика стала основним стабілізуючим фактором національної енергосистеми.

Усі ці факти разом із аналізом енергетичних потреб країни та можливостей їх задоволення вказують на доцільність та необхідність розвитку

атомної енергетики в Україні. Обираючи такий шлях, слідуватимемо світовим трендам.

Стратегією планується збереження протягом 2006 – 2035 рр. частки виробництва електроенергії АЕС на рівні, досягнутому у 2005 році (тобто, близько половини від сумарного річного виробництва електроенергії в Україні). Таке рішення обґрунтовується наявністю власних сировинних ресурсів урану, а також – стабільною роботою АЕС, потенційними можливостями країни щодо створення енергетичних потужностей на АЕС, наявними технічними, фінансовими та екологічними проблемами теплової енергетики [1].

Але з поміж тим, блоки АЕС близькі, а деякі вже й перевищили свій проектний строк. Крім того, в зв'язку зі збільшенням частки вироблення електроенергії на АЕС, великі енергоблоки потужністю 1000 МВт змушені працювати не в розрахунковому базовому, а на змінних режимах. Це веде за собою збільшення кількості пусків і зупинок, що є додатковим навантаженням на обладнання і кількість яких за весь термін служби обмежена нормативними документами. Робота на змінних режимах може привести до необхідності розгляду питання про передчасне виведення деяких атомних енергетичних блоків з експлуатації. Така ситуація вимагає термінового проведення комплексу робіт по аналізу стану обладнання станції, а також розробки рішень щодо продовження його строку експлуатації.

Одним з важливих елементів атомної електростанції, якому варто приділити багато уваги, є стопорно-регулюючий клапан (СРК), який є частиною паророзподільчої системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує ряд робіт присвячених зазначеній проблематиці, на які варто звернути увагу, але вони в основному зосереджені на розгляді і вирішенні зазначених проблем для таких елементів електростанцій, як турбіни, парогенератори і тд. Але, одним з елементів обладнання електростанції, що теж потребує докладної уваги, є система паророзподілення парової турбіни, яка регулює і запобігає подачу пари в проточну область. Конструктивно вона складається з ряду клапанів, з'єднаних паропроводами: стопорний клапан (СК), виконує повне перекриття подачі пари в турбіну, та регулюючі клапани (РК).

Існує багато проблем, які стосуються паропроводів та клапанів, а саме: ці деталі знаходяться під дією корозії, ерозії та великих термічних напружень при перемінних режимах роботи, особливо при пусках та зупинках, а також вібрації, що

зумовлена відсутністю надійної фіксації клапанів в заданому положенні [2].

В нормативних документах [2-4], які офіційно визнані в галузі, описані граничні умови теплообміну в елементах турбоустановок та методи їх розрахунку. Цими методами та вказівками керувались автори робіт [5, 6] при оцінці залишкового ресурсу та подовження експлуатації корпусів та роторів парових турбін, клапанів та інших деталей енергоблоків.

Робота [5] присвячена проблемі продовження терміну експлуатації енергетичного обладнання. Предметом дослідження роботи були пошкоджувальність і залишковий ресурс автоматичних захисних клапанів циліндра середнього тиску парової турбіни К-200-130. Отримано дані по тепловому і напружено-деформованому стану корпусів клапанів для різних режимів пуску. Визначено сумарну пошкоджувальність і індивідуальний залишковий ресурс. Розрахунки виконувались згідно з [2, с. 44, 3, с. 12].

В роботі [6] була запропонована оцінка ресурсу деталей турбоустановок, описана методика розрахунку теплового стану цих деталей при характерних режимах роботи. Розраховувались граничні умови теплообміну в контрольних точках відповідно до [3, 4], що показані на розрахункових геометричних моделях, в яких визначались розмахи інтенсивності напружень за всі періоди пусків з різних теплових станів. Проте, такий підхід до визначення ресурсу деталей турбоустановок включає в себе людський фактор і, таким чином, потребує великих затрат часу на розрахунки граничних умов I-IV роду. Зауважимо, що з достатньою точністю неможливо визначити граничні умови I-IV роду для об'єктів, які мають складну геометричну форму. Також варто звернути увагу на конструктивні зміни в деталях турбоустановок, які виникли під час всього терміну експлуатації, які неможливо з достатньою точністю врахувати за допомогою методики, яка наведена в [5-6].

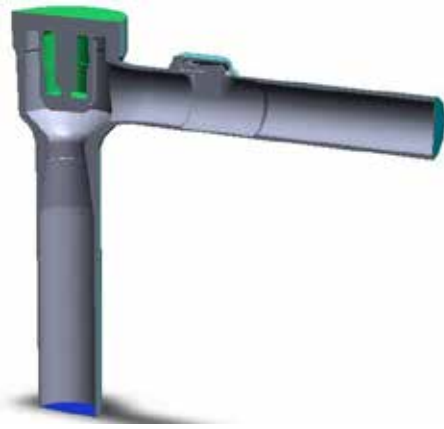
**Постановка завдання.** Детально проаналізувавши останні дослідження та публікації, було зроблено висновок, що вищевказані методи та підходи до визначення ресурсу клапанів є трудомісткими при розрахунках граничних умов та недостатньо точні для об'єктів складної геометричної форми.

Метою даної роботи є розробка альтернативного підходу до визначення теплового та напружено-деформованого стану стопорно-регулюючого клапана атомної електростанції, що базується на заміні трудомісткого процесу розрахунку

граничних умов теплообміну моделюванням газодинаміки течії вологої пари.

В даній роботі буде розглянуто газодинамічні процеси та напружено-деформований стан стопорно-регулюючого клапана системи паророзподілу Хмельницької атомної електростанції (ХАЕС) енергоблоку № 2 від парогенератора (ПГ) № 2.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Стопорно-регулюючий клапан призначений для дроселювання пари, що подається в турбіну, і для швидкого перекриття надходження пари у разі спрацьовування захисту або впливу оператора. Закриття СК перекриває також надходження гострої пари на обігрів 2-го ступеня сепарації та перегріву пари[8]. На рис. 1 представлена геометрична модель стопорно – регулюючого клапана енергоблоку №2 від ПГ №2 Хмельницької АЕС, створена в системі 3D- моделювання SolidWorks.



**Рис. 1. Геометрична модель СК енергоблоку № 2 ХАЕС**

Для дослідження газодинаміки було в стопорно-регулюючому клапані створено математичну модель. У математичну модель дослідження газодинаміки входять закони збереження енергії, маси, імпульсу, рівняння стану рідини або газу, різноманітні замикаючі співвідношення, граничні і початкові умови [12, 13]. Вирішення вищезазначених рівнянь засноване на методі кінцевих об'ємів, який передбачає їх інтегрування за об'ємами комірок розрахункової сітки.

По теоремі Гауса для довільної векторної або тензорної величини:

$$\int_{\Omega} (\nabla \cdot F) d\Omega = \sum_{i=faces} (F_i \cdot n_i) \cdot \Delta S_i \quad (1)$$

$\Omega$  – об'єм комірки

$\Delta S_i$  – площа і-ї грані комірки

Таким чином, при інтегруванні розв'язуваних рівнянь в комірках проводиться підсумовування

потоків маси, імпульсу, енергії і турбулентних величин, обчислених на гранях комірок. В якості числової моделі для реалізації наведеної вище аналітичної моделі було обрано програмний комплекс FlowVision 3.12.01.

В таблиці 1 наведені параметри, які приймалися в якості вихідних і граничних умов, отримані з Хмельницької атомної електричної станції енергоблоку № 2 [10].

Таблиця 1

**Вихідні та граничні умови для дослідження газодинамічних процесів в СК [10]**

Назва параметру	Значення
Тиск пари перед СК ЦВТ (абс.), МПа	5,88
Температура пари перед СК ЦВТ, °С (К)	274 (547)
Ступінь сухості пари, %	0,995
Шорсткість, м	10 <sup>-4</sup>
Витрата пари на вході в клапан, т / год	1340

Поставлене завдання вирішувалося в 3-х мірній, стаціонарній постановці, з застосуванням моделі повністю стисливої рідини. Робоче середовище (волога пара) представлено в моделі у вигляді двофазної суміші пари та крапель вологи з урахуванням ступеня сухості пари та реологічних властивостей окремих фаз. В ході пробних розрахунків були уточнені параметри розрахункової моделі (часовий крок, умови адаптації розрахункової сітки), які дозволили оптимізувати розрахунок і отримати хороший збіг з експериментальними даними, отриманими безпосередньо на станції. В результаті проведеного комплексу чисельних експериментів були отримані дані 3-D газодинамічної структури потоку, розподіл швидкостей в потоці, температурних полях, розподіли тисків. Аналіз результатів чисельного моделювання дав можливість досить докладно вивчити газодинамічні характеристики течії вологої пари по паропроводах. Чисельне моделювання дозволило оцінити вплив геометрії клапана на газодинаміку потоку. Отримані дані по розподілу тиску, температури та швидкостей в повздовжньому та поперечному перерізах клапана при стаціонарному режимі зображено на рис. 2 – рис. 4. На рис. 2 можна побачити зосередження максимальних тисків на вході у вхідний патрубок та в області запірної часті штока клапана, де відбувається розбиття потоку пари.

Для наочного уявлення про формування вхідного потоку у передуючому елементі проточного тракту на рис. 4 (б) зображено результати розподілу швидкості в клапані. Результати

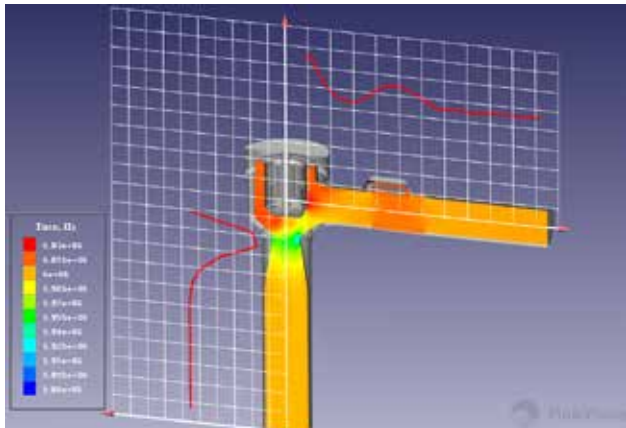


Рис. 2. Розподіл тиску при стаціонарному режимі в проточному тракті клапана

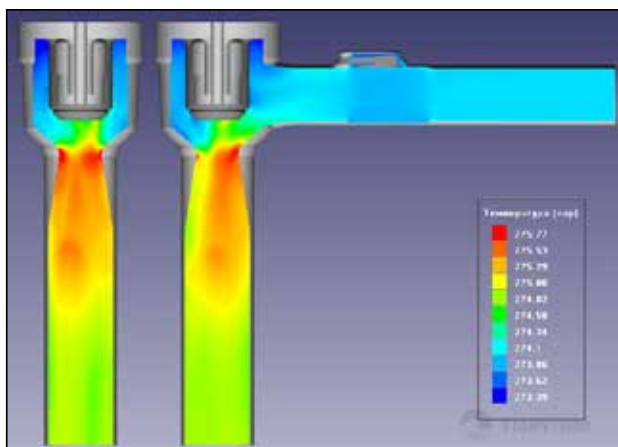


Рис. 3. Розподіл температури при стаціонарному режимі в проточному тракті СРК

візуалізації структури течії у відсіку регулюючого клапана представлено на рис. 4 (а). Зони прискорення потоку пара зосереджені в області між запірною чашею та сідлом клапана. Структура потоку в тракті паровипуску для стаціонарного режиму роботи має вихровий характер. Наявність конструкції СРК з одностороннім бічним підведенням пари в клапанну коробку призводить до формування нерівномірності парового потоку перед входом в клапанний канал. При такому підводі порушується осьова симетрія течії в проточній частині дифузійної частини сідла, що викликає відрив потоку та утворення циркуляційної течії, яка отримує подальший розвиток нижній частині клапана (рис. 4.б). Утворений нерівномірний потік сприймається металом корпусу клапана і призводить до виникнення можливих негативних наслідків, таких як виникнення зон вихроутворення. Маючи наглядне зображення структури потоку в проточному тракті клапана, з виникненням вихорів в пристінних зонах клапана, можна відмітити, що завихрення потоку впливають на напружено-деформований стан металу корпусу клапана.

Як видно по рис. 4,б при повному відкритті СРК в зазорі між запірною чашею та сідлом відбувається значне прискорення потоку. При такому режимі течії й різкому збільшенні прохідної площі в клапанному каналі неминуче відбувається відрив потоку, як від профільної поверхні запірної

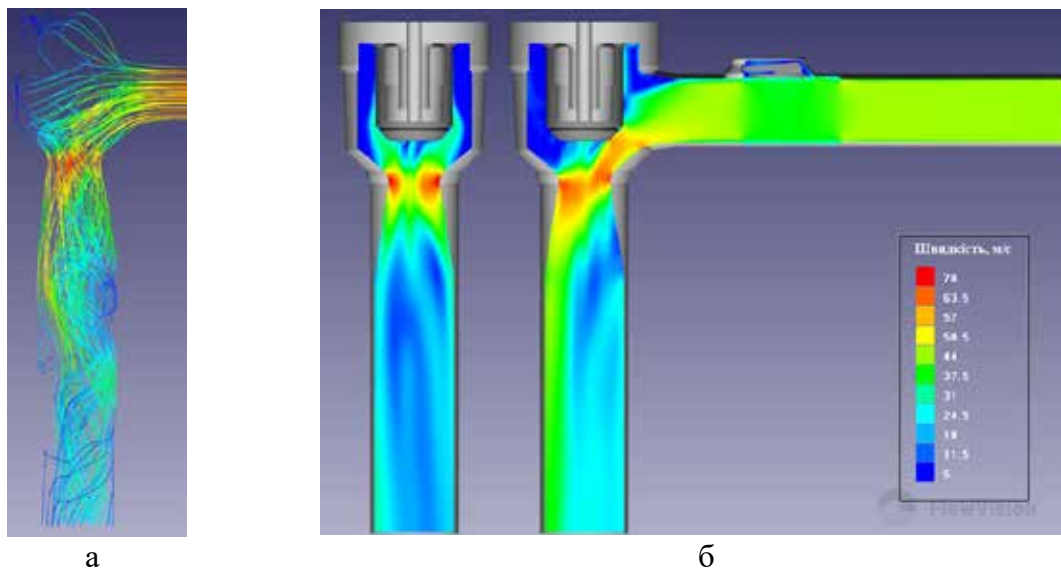


Рис. 4. Візуалізація ліній потоку в тракті РК (а); розподіл швидкостей при стаціонарному режимі в проточному тракті клапана

чаші, так і від поверхні сідла. Велика частина області циркуляційної течії утворюється в дифузійній частині сідла з боку підвідного патрубка клапана, де потік має найбільшу локальну швидкість. Сформований таким чином потік потрапляє у нижню проточну частину клапана, де отримує додаткову турбулізацію через подальше різке збільшення прохідного перерізу в циліндричній частині клапана.

На рис. 5 зображений тепловий стан металу стопорно-регулюючого клапана.

На наступному етапі розраховано НДС СРК на базі отриманих раніше даних по розподілу температурного поля по об'єму корпусу клапана та газодинаміки робочого середовища. Напружено-деформований стан стопорно-регулюючого клапана енергоблоку № 2 ХАЕС енергоблоку № 2 турбіни К-1000-60/3000 представлено на рис. 6.

Напружено-деформований стан корпусу клапана формує сумісна дія температурних напружень і напружень від тиску.

З результатів розрахунку напружено-деформованого стану видно, що максимальні напруження (98 МПа) виникають в місцях кріплення вхідного патрубка та сідла клапана. Зважаючи на те, що межа міцності матеріалу клапана 720 МПа, максимальні розрахункові напруження не є критичними. Отже, статична складова пошкоджуваності металу не значно впливає на довготривалу міцність.

За рахунок виникнення вихорів у вихідній проточній частині клапана відбуваються циклічні флуктуації тиску у пристінковій зоні, що в свою чергу викликає прискорення циклічної пошкоджуваності металу корпусу у відповідних місцях. Отже, можна прогнозувати, що зони деградації та розтріскування металу можуть бути зосереджені в місцях, де присутні завихрення потоку (рис. 4).

**Висновки.** В результаті виконаного моделювання процесу течії вологої пари в стопорно-регулюючому клапані на енергоблоці № 2 Хмельницької АЕС отримані дані щодо розподілу тисків, температур і швидкостей робочого тіла.

Розглянуто особливості протікання пари в стопорно-регулюючому клапані та особливості утворення вихорів в проточному тракті клапана, їх вплив на внутрішні стінки клапана. Проведено аналіз впливу температури та тиску пари на внутрішні стінки регулюючого клапана.

Представлений спосіб числових досліджень дає можливість провести більш повний аналіз досліджуваного об'єкта, а саме провести комплекс

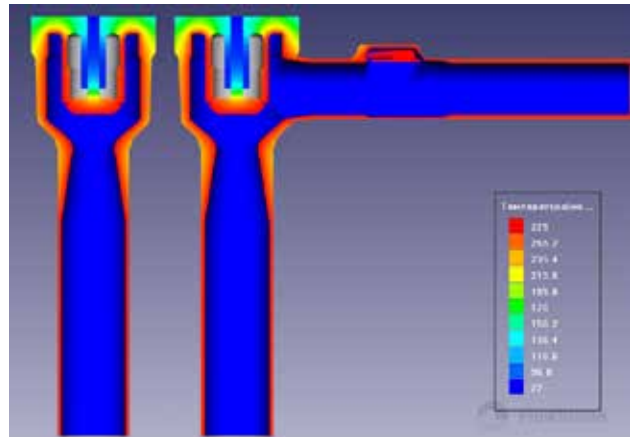


Рис. 5. Тепловий стан металу СРК при розрахунку газодинаміки за допомогою ПК Flow Vision 3.0

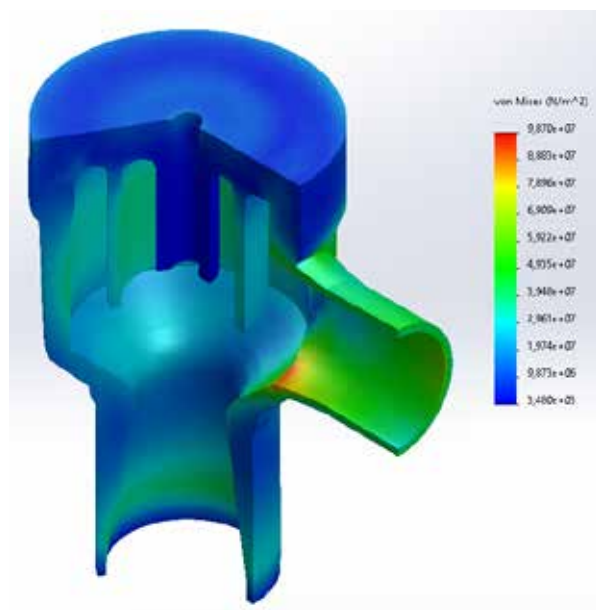


Рис. 6. НДС СРК енергоблоку № 2 ХАЕС

числових експериментів по визначенню газодинаміки клапана з можливістю визначення наявних напружень та завчасного прогнозування пошкоджень в конструкції клапана.

Проведено комплекс числових експериментів по дослідженню напружено-деформованого стану корпусу клапана. Визначено наявні напруження в корпусі стопорно-регулюючого клапана енергоблоку №2 ХАЕС від ПГ №2. Відзначено, що за рахунок виникнення вихорів у вихідній проточній частині клапана відбуваються циклічні флуктуації тиску у пристінковій зоні, що в свою чергу викликає прискорення циклічної пошкоджуваності металу корпусу у відповідних місцях.

У подальшому отримані дані можуть будуть використані для визначення залишкового ресурсу головних паропроводів АЕС.

Список літератури:

1. Энергетика: история, настоящее и будущее. ТЗ. Развитие тепловой и атомной энергетики. Базеев Е.Т., Билека Б.Д., Васильев Е.П. и др. К., ООО „Редакция издания”. *Энергетика: история, настоящее и будущее*. 2008. 528с.
2. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. Офіц. вид. К.: ГРІФРЕ: *М-во палива та енергетики України*, 2005. 76 с.
3. РТМ 24.020.16-73. Турбины паровые стационарные. Расчёт температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования. М., 1973. № ВК-002/3209. 104 с.
4. РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. М., 1996. 98 с.
5. Оценка индивидуального ресурса литых корпусов автоматических защитных клапанов энергоблоков мощностью 200 МВт. О.Ю. Черноусенко, Д.В. Риндюк, В.А. Пешко, В.Ю. Горяженко. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, № 13(1289) 2018. С. 26-32.
6. Комплексна схема оцінювання залишкового ресурсу роторів парових турбін великої потужності. О.Ю. Черноусенко, Т.В. Нікуленкова. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Х.: НТУ «ХПІ», 2013. № 14(988). С. 54-61.
7. Аналіз підходів до оцінки теплового та напружено-деформованого стану елементів паропроводів АЕС. Беднарська І.С., Риндюк Д.В. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Том 30 (69) Ч. 2 № 2 2019. С. 12-16.
8. 43-923.203.007.БД.05 Хмельницька АЕС. Енергоблок №2. База даних ЯПВУ. Частина 5. Технологічні системи другого контуру.
9. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Система паропроводів свіжої пари (ТХ, РА). Технічний опис. № 2.ТЦ.0245.ТО-01.
10. Турбіна парова К-1000-60/3000. *Інструкція з експлуатації. Технічний опис*. № 2ТЦ.0244.ТО-01.
11. FlowVision. Версія 3.09.04. Керівництво користувача [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8dokumentatsiyaflowvision?download=112:3-09-04-pdf-enu>
12. Андерсон Д., Таннехілл Дж., Плетчер Р. (1990) "Обчислювальна гідромеханіка та теплообмін", Москва, Мир, Т. 1 – 2.
13. Флетчер К. (1991) "Обчислювальні методи в динаміці рідин", Москва, Мир, Т. 1 – 2.
14. Моделирование газодинамики влаогой пари в головних паропроводах атомної електростанції [Текст] / І.С. Беднарська, Д.В. Риндюк, Лементар С.Ю. // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*, Том 32 (71) № 5 2021, с.159-167. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/25>

**Bednarska I.S., Rindyuk D.V. DETERMINATION OF THE STRESSED AND DEFORMED STATE OF THE STOPPING AND REGULATING VALVE OF A NPP TAKING INTO ACCOUNT THE GAS DYNAMICS OF THE WORKING BODY**

*The article is devoted to the development of a method for determining the thermal and stress-strain state of a stop-control valve of a nuclear power plant, which is based on replacing the time-consuming process of calculating the boundary conditions of heat exchange by modeling the gas dynamics of the flow of wet steam. In this paper, the gas-dynamic processes and the stress-strain state of the stop-control valve of the steam distribution system of the Khmelnytsky Nuclear Power Plant (KhNPP) of power unit №2 from steam generator №2 are considered. As a result of the modeling of the flow of wet steam in the stop-control valve at power unit №2 of the Khmelnytsky NPP, data on the distribution of pressures, temperatures, and speeds of the working fluid were obtained. The features of steam flow in the stop-control valve and the features of the formation of vortices in the flow path of the valve, their effect on the inner walls of the valve, are considered. An analysis of the effect of temperature and steam pressure on the inner walls of the control valve was carried out. The presented method of numerical research makes it possible to conduct a more complete analysis of the object under study, namely to conduct a complex of numerical experiments to determine the gas dynamics of the valve with the possibility of determining the available stresses and early prediction of damage in the valve structure. A set of numerical experiments was conducted to study the stress-strain state of the valve body. The existing stresses in the housing of the stop-control valve of power unit № 2 of KhNPP from steam generator № 2 were determined. It was noted that due to the appearance of vortices in the outlet flow part of the valve, cyclic pressure fluctuations occur in the wall zone, which in turn causes an acceleration of the cyclic damage of the body metal in the corresponding places. In the future, the obtained data can be used to determine the residual resource of the main steam pipelines of the NPP.*

**Key words:** nuclear energy, valve, gas dynamics, mathematical modeling.