

Риндюк Д.В.

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

Беднарська І.С.

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

ВПЛИВ ПАРОВОГО СИТА НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН РЕГУЛЮВАЛЬНОГО КЛАПАНА

У статті досліджено вплив парового сита на напружено-деформований стан (НДС) регулювального клапана парової турбіни К-1000-60/3000, який є важливим елементом паророзподільної системи атомних електростанцій України. Надійність та безпека роботи цього обладнання є критично важливими, адже дефекти металу корпусу клапана можуть призводити до аварійних ситуацій. Використано сучасні методи математичного моделювання для аналізу газодинамічних процесів і розрахунку НДС із врахуванням конструктивних особливостей клапана, зокрема парового сита. Моделювання виконано із застосуванням спеціалізованих програмних комплексів FloEFD та SolidWorks Simulation. Газодинамічні розрахунки проводилися на основі рівнянь Нав'є-Стокса для стисливого потоку з урахуванням законів збереження енергії, маси та імпульсу. Врахування впливу парового сита дозволило отримати детальні дані про розподіл тисків, швидкостей та температур у середині клапана. Результати дослідження показали, що парове сито створює локальний опір, який значно впливає на нерівномірність розподілу температурного поля та турбулентність потоків пари. Пояснено вплив дисипації енергії, яка посилюється через зіштовхування потоків пари, на виникнення локальних градієнтів температури та напружень, що виявляються одними з причин утворення мікротріщин у металі корпусу клапана. Проведений аналіз продемонстрував, що ігнорування впливу парового сита призводить до заниження рівня напружень у зонах розтріскування металу, що може викликати похибки у прогнозуванні довговічності обладнання. Отримані результати підтверджують важливість врахування реальних конструктивних елементів при моделюванні елементів паророзподільних систем. Це дозволяє підвищити точність інженерних розрахунків і забезпечити більш високу експлуатаційну надійність обладнання в подальшому.

Ключові слова: регулювальний клапан, парове сито, напружено-деформований стан, газодинамічне моделювання.

Постановка проблеми. У сучасній енергетиці забезпечення надійності та ефективності роботи енергетичного обладнання є ключовим завданням. Більшість потреб в електроенергії в Україні покривається атомними електричними станціями (АЕС). Безперебійну роботу та регулювання потужності станції забезпечує паророзподільна система паропроводів та клапанів. Одними з важливих елементів паророзподільної системи АЕС є регулювальні клапани (РК) турбін К-1000-60/3000, більшість яких є основним генеруючим обладнанням атомних електростанцій України. Конструкція РК здійснює кількісне регулювання потоків пари, що забезпечує роботу всієї турбоустановки. Надійність та безпека роботи даного конструктивного елемента має важливе значення. Однак, у практиці експлуатації цього обладнання неодноразово фіксувалися виникнення дефектів металу корпусу

РК, зокрема розтріскування в окремих областях, що суттєво впливає на довговічність, надійність і безпеку роботи. Виявлення причини виникнення таких дефектів доцільно проводити опираючись на сучасні методи математичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують різні методики для дослідження процесів, що відбуваються в високотемпературних конструктивних елементах парових турбін. Зазвичай подібного типу задачі вирішуються за допомогою класичних методик, регламентованих в міжнародних або державних стандартах, які засновані на розрахунках граничних умов теплообміну відповідно до вимог нормативних документів, зокрема в Україні згідно з РТМ [1, 2]. На основі підходів викладених в [1, 2] здійснювалося подальше визначення напружено-деформованого стану (НДС) основного металу високотемпературного

обладнання. Проте такий підхід виявився недостатньо точним. У багатьох випадках результати розрахунків не могли пояснити появу дефектів металу, зокрема тріщин, у деяких областях корпусу клапана [3].

Згодом, із розвитком обчислювальної техніки і програмного забезпечення для інженерного аналізу, було запропоновано визначати НДС на основі результатів моделювання газодинамічних процесів у клапані. Використання сучасних систем автоматизованого проектування (САПР) дозволило суттєво підвищити точність розрахунків. Зокрема, в роботах [4, 5] проведено газодинамічне моделювання клапана з подальшим визначенням НДС, що дало змогу отримати значно точніші результати порівняно з попередніми методами. Ці роботи також показали, що врахування реальних умов роботи клапана є ключовим фактором для забезпечення достовірності аналізу.

Однак, через складність конструкції, у більшості досліджень не враховувалася наявність парового сита, яке є важливим елементом конструкції. Парове сито виконує функцію вирівнювання потоків пари, що проходять через клапан, і водночас створює додатковий опір та змінює розподіл тиску і температури в середині пароприймальної камери. Це впливає на температурні градієнти та розподіл напружень у металі корпусу клапана, а ігнорування цього фактора може призводити до суттєвих похибок у результатах моделювання. Наприклад, у роботах [6, 7] показано, що ігнорування впливу додаткових конструктивних елементів може бути основною причиною некоректних результатів та неповного врахування факторів, що впливають на НДС.

Таким чином варто звернути детальну увагу на конструктивні особливості досліджуваного обладнання та їх вплив на газодинамічні процеси.

Постановка завдання. У рамках даного дослідження було проведено детальне моделювання газодинаміки регулювального клапана турбіни К-1000-60/3000 з урахуванням наявності парового сита з метою уточнення його впливу на напружено-деформований стан металу корпусу.

Основні завдання дослідження:

- моделювання газодинамічних процесів у клапані з урахуванням наявності парового сита;
- визначення впливу парового сита на розподіл тисків, швидкостей та температур теплоносія у пароприймальній камері клапана;
- розрахунок напружено-деформованого стану сита та корпусу клапана.

Виклад основного матеріалу. На сучасному етапі розвитку обчислювальної техніки для аналізу двофазних потоків і детального розрахунку температурних і напружено-деформованих станів доцільно використовувати спеціалізовані програмні комплекси інженерного аналізу.

Розглянуто тривимірну модель регулювального клапана із врахуванням парового сита, що функціонує у системі паророзподілення турбіни К-1000-60/3000.

Математичну модель газодинамічних процесів, що протікають в регулювальному клапані турбіни К-1000-60/3000, було створено на базі програмного комплексу FloEFD, який забезпечує моделювання багатофазних потоків. Детальний аналіз термо-напруженого стану металу корпусу РК здійснювався з використанням програмного комплексу SolidWorks Simulation.

Газодинаміка клапана врахована на основі рівнянь Нав'є-Стокса для стисливого потоку [9]. У математичну модель також входять закони збереження енергії, маси, імпульсу, рівняння стану рідини або газу, різноманітні замикаючі співвідношення, граничні і початкові умови. Вирішення вищезазначених рівнянь засноване на методі кінцевих об'ємів, який передбачає їх інтегрування за об'ємами комірок розрахункової сітки. Для кожного об'єму розраховуються потоки через його грані (зміна маси, імпульсу, енергії).

Використано алгоритм адаптації скінченно-об'ємної сітки в розрахунковій області в залежності від градієнтів основних параметрів. Варто відмітити, що скінченно-об'ємна сітка розподілилася між комірками в текучому середовищі, в твердому тілі та на границі розділу твердого тіла та текучого середовища: 2,1 млн; 1,2 млн; 1,4 млн відповідно.

За початкові та граничні умови прийнято реальні умови експлуатації клапана, отримані на енергоблоці № 2 Хмельницької АЕС: температура вологої пари $t = 274,3$ °С; тиск пари після парогенератора $P = 6,3$ МПа; ступінь сухості пари $x = 0,995$; витрата пари від усіх парогенераторів $G = 5870$ т/год; шорсткість для досліджуваних труб 10^{-4} м. Також враховувались такі параметри пари, як молярна маса, критичні температура та тиск, коефіцієнт стисливості в критичній точці. Для прогнозування поведінки пари застосовувалось рівняння Редліха-Квонга: двопараметричне рівняння стану реального газу, як покращення рівняння Ван дер Ваальса [11].

Відповідно до залежності в'язкості пари від температури динамічна в'язкість (η) розраховувалась за рівнянням (1):

$$\eta = 1,67 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0,76} \quad (1)$$

Питома теплоємність (C_p) в залежності від температури обчислювалась наступним чином:

$$C_p = 30,092 + 0,006832 \cdot T + (9,081 \cdot 10^{-6}) \cdot T^2 + (1,439 \cdot 10^{-9}) \cdot T^3 \quad (2)$$

Коефіцієнт теплопровідності (λ) розраховувався за допомогою степеневі залежності:

$$\lambda = 0,024 \cdot T^{0,72} \quad (3)$$

При фазовому переході, коли пара конденсується, динамічна в'язкість (η) капель води визначалась за рівнянням (4):

$$\eta = 0,0012 \cdot T^{-1} \quad (4)$$

А коефіцієнт теплопровідності для капель води розраховувався за наступною залежністю від температури:

$$\lambda = 0,606 \cdot T^{0,5} \quad (5)$$

Тривимірна модель клапана включала основні елементи: корпус, сідло, регулювальний орган і парове сито. Окрему увагу приділили деталізації отворів у ситі, які суттєво впливають на паро-

розподіл. Розрахункова модель представлена на рисунку 1.

Результати моделювання дозволили визначити розподіл швидкостей, тисків і температур по об'єму клапана. Врахування наявності сита при моделюванні суттєво підвищило точність визначення газодинамічних, термодинамічних та механічних процесів в клапані, та дало можливість врахувати нерівномірний розподіл тиску, температури та турбулентність потоків пари, а це, в свою чергу, матиме суттєвий вплив на напружено-деформований стан металу корпусу клапана.

З точки зору газодинаміки, сито створює локальний опір, що викликає значну втрату тиску пари, урахування цього ефекту дає можливість оцінити газодинамічні втрати в клапані (рис. 2, а). Також варто відмітити, що проходження пари через отвори сита сприяє вирівнюванню швидкості потоку після сита, що впливає на подальший рух пари (рис. 2, б). Отвори сита спричиняють утворення локальних турбулентних структур у потоці, які безпосередньо впливають на характер течії, а отже й на гідравлічний опір, тепловіддачу та рівномірність теплообміну.

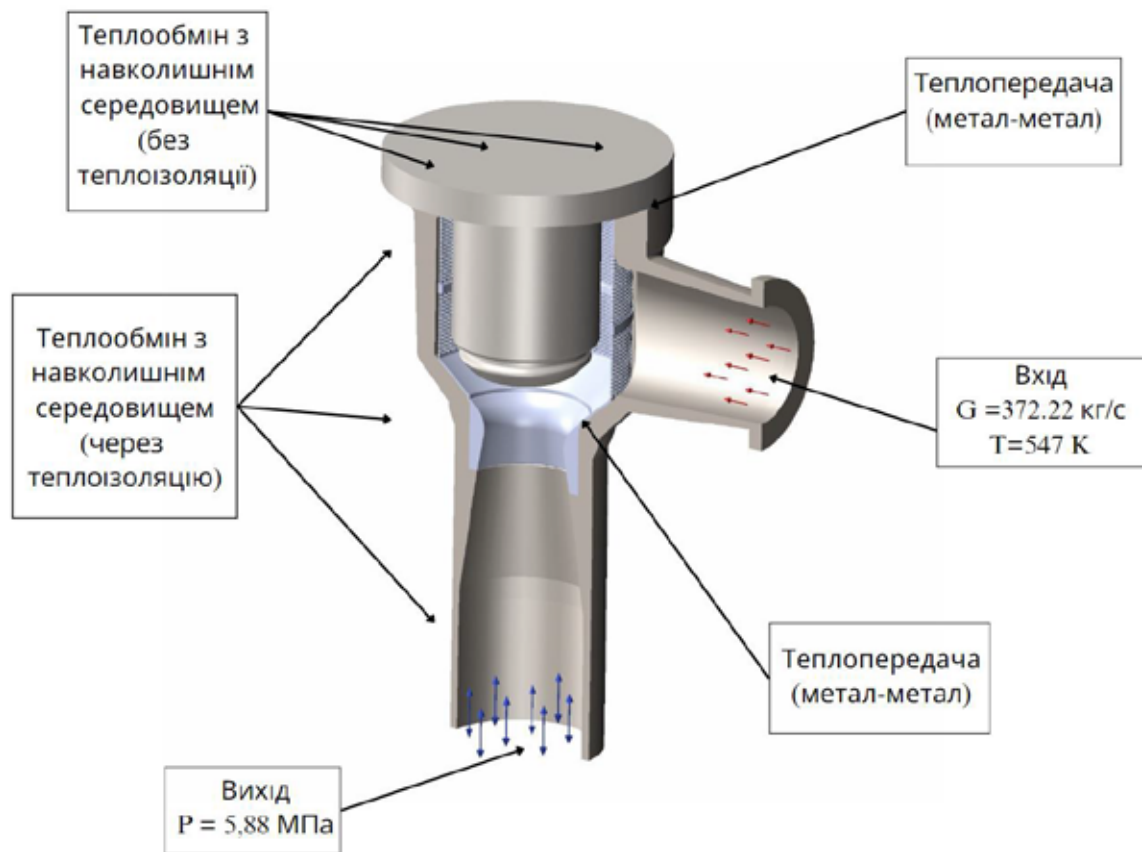


Рис. 1. Розрахункова модель регулювального клапана турбіни К-1000-60/3000

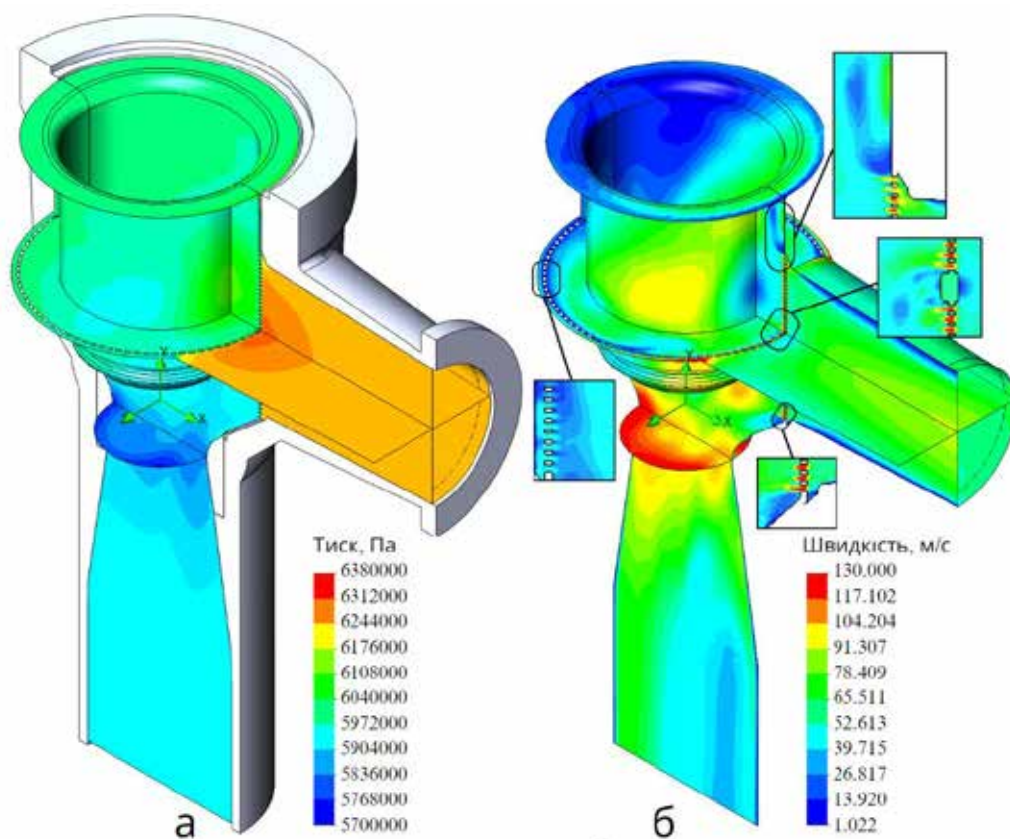


Рис. 2. Результати моделювання газодинаміки: а – розподіл тиску в клапані; б – розподіл швидкостей в клапані

З однієї сторони, сито сприяє вирівнюванню температурного поля пари перед її контактом з штоком та нижньою частиною корпусу клапана. Це впливає на локальні градієнти температури, які важливі для оцінки термічних деформацій металу.

З іншого боку, турбулентність, що утворюється між корпусом клапана та ситом (рис. 3), підвищує коефіцієнт тепловіддачі від пари до металу корпусу клапана. Без урахування цього ефекту можуть бути занижені значення температури металу РК (рис. 4). Нерівномірний теплообмін через неоднорідний розподіл швидкості пари впливає на градієнти температур у металі корпусу, що, як відомо, є основною причиною виникнення термічних напружень. Відмітимо, що сито змінює профіль тиску пари в клапані, його розподіл на стінки корпусу, а це напряму впливає на напружено-деформований стан клапана.

Як видно на рис. 4, розподіл температур в перфорованій частині фільтруючого сита клапана є майже рівномірним ($T = 547$ K). Деяке заохолодження сита (до $536 - 542$ K) відбувається в місцях контакту сита з металом корпусу клапана в результаті інтенсифікації теплообміну. Викликають цікавість зони 1 та 2 в яких має місце локальне

підвищення температури металу сита до 548 K, що перевищує температуру теплоносія (пари) на вході в клапан на ~ 2 K. В роботі [10] автор пояснює локальне підвищення температури сита (в 12 °C) на вході до пароприймальної камери клапана тим, що «... під час набігання потоку пари ... на фільтруючому ситі відбувається його гальмування. При цьому відбувається перехід кінетичної енергії потоку пари в теплову».

У випадку, що розглядається в даній статті підвищення температури в зоні 1 на 2 K аналогічне описаному в роботі [10]. Проте локальне підвищення температури, що має місце в зоні 2, на думку авторів, має дещо іншу природу. Аналіз газодинаміки пари показує виникнення значних турбулентних вихорів в задній частині пароприймальної камери (область 2) між фільтруючим ситом та корпусом клапану (рис. 3), де відбувається зіштовхування двох зустрічних потоків пари. Коли два потоки пари з різними швидкостями або напрямками руху зустрічаються, утворюються зони змішування. Відомо, що в таких зонах відбувається інтенсивна дисипація енергії, тобто процес розсіювання кінетичної енергії у вигляді тепла або внутрішньої енергії внаслідок

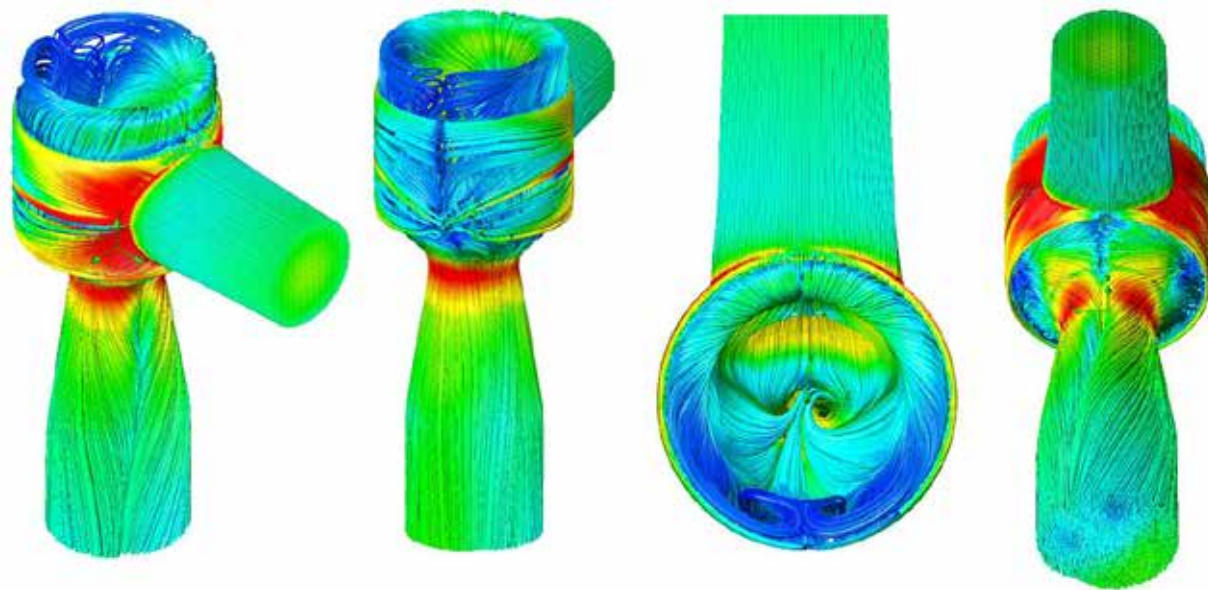


Рис. 3. Лінії потоку пари в клапані

док дії в'язкості, тертя або турбулентності в парі. При русі потоку частинки середовища взаємодіють через внутрішнє тертя (в'язкість), що в свою чергу, призводить до передачі енергії між шарами потоку з різними швидкостями та викликає її перетворення у теплову енергію. Турбулентність інтенсифікує цей процес. При зустрічі потоків утворюється значний градієнт швидкостей, який викликає зсувні напруження. Ці напруження сприяють передачі енергії між шарами пари, що збільшує дисипацію енергії. Наслідком дисипації енергії є локальне підвищення температури, що має місце в зоні 2. Відмітимо також, що описаний вище процес в дещо менших масштабах діє по всій розрахунковій області, що видно по незначному підвищенню температури перфорованої частини фільтруючого сита на 0,5–1 К відносно температури теплоносія (пари) на вході в клапан. Оскільки нерівномірність температур є досить незначною, то її вплив досить слабо прослідковується на світлині розподілу напружено-деформованого стану сита (рис. 5, а).

Отримані результати підтверджують гіпотезу про вплив парового сита на НДС клапана. На рис. 5(б) наведено НДС металу корпусу клапана. Зона розтріскування знаходиться безпосередньо біля області значної дисипації енергії, що виникає внаслідок зіткнення потоків і там, як видно, спостерігаються значні напруження металу корпусу. Таким чином врахування реального розподілу потоку дозволило пояснити виникнення дефектів у металі в зоні розтріскування, що вказана на рисунку 5(б).

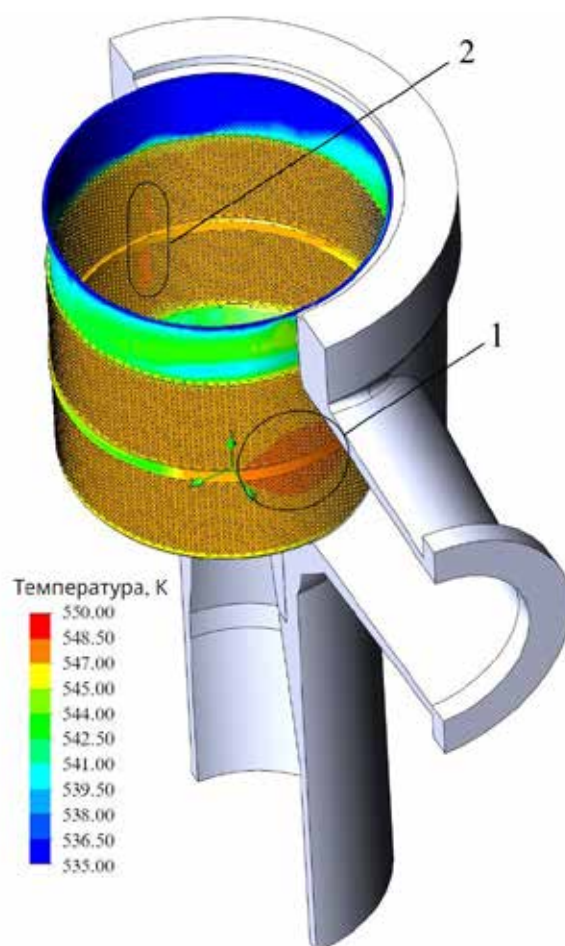


Рис. 4. Розподіл температур по ситу клапана

Висновки. Виконано моделювання газодинамічних процесів у клапані парової турбіни К-1000-60/3000 з урахуванням наявності парового

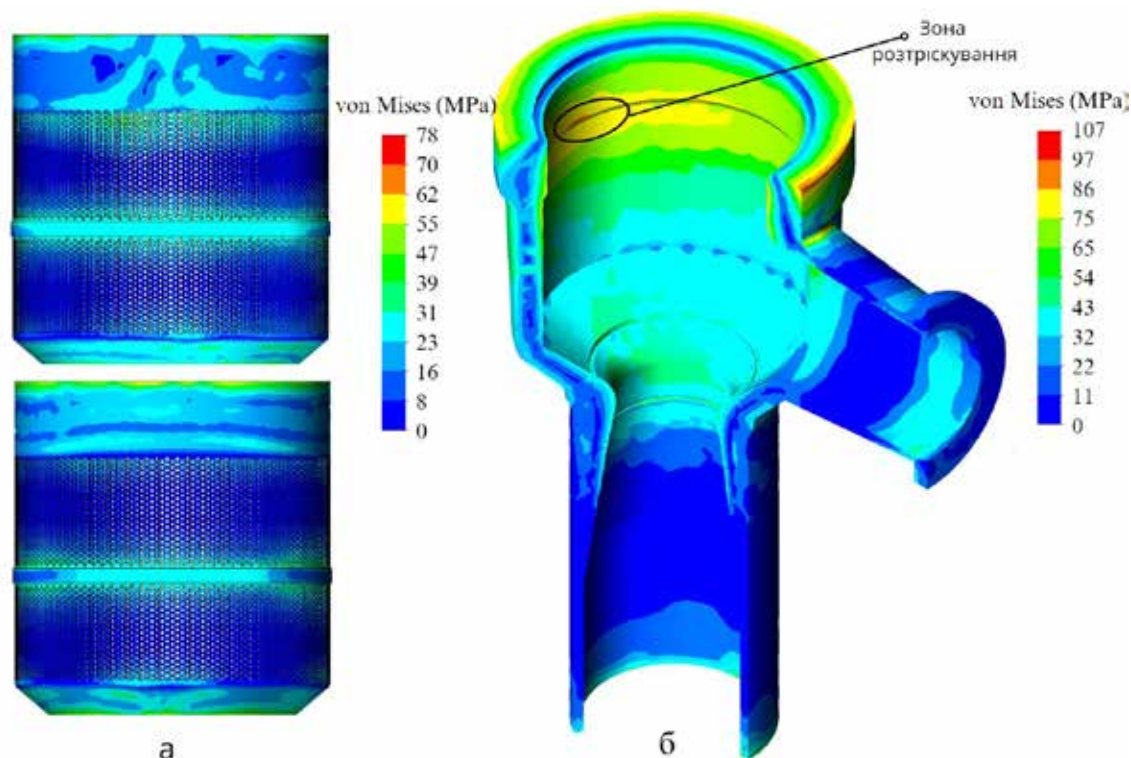


Рис. 5. Результати розрахунків напружено-деформованого стану клапана: а – напружено-деформований стан фільтруючого сита; б – напружено-деформований стан металу корпусу клапана

сита. Встановлено, що парове сито суттєво впливає на газодинамічні процеси, зокрема на розподіл швидкостей, температур і тисків у середині клапана.

Розраховано напружено-деформований стан металу сита та металу корпусу клапана. Проведено аналіз впливу парового сита на напружено-деформований стан регулювального клапана парової турбіни К-1000-60/3000.

Виявлено, що локальні градієнти температури, викликані дисипацією енергії, яка виникла

при зіштовхуванні двох зустрічних потоків пари, є однією з причин підвищення рівня напружень у металі корпусу клапана. Це пояснює утворення мікротріщин, які виявлені під час експлуатації РК, в пароприймальній камері у зонах протилежних паровпуску.

Відзначено, що ігнорування впливу парового сита у процесі моделювання може призводити до суттєвих похибок у подальшому прогнозуванні довговічності конструкції клапана.

Список літератури:

1. РТМ 24.020.16-73. Стационарные паровые турбины. Расчет температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования. М., 1973. № ВК-002/3209. 104 с.
2. РД 34.17.440-96. Методические указания щодо порядку проведення робіт з оцінки індивідуального ресурсу парових турбін і продовження терміну їх експлуатації понад парковий ресурс. М., 1996. 98 с.
3. Іванов П. П., Кузнецов М. В. Аналіз причин руйнування клапанів високого тиску. *Теплоенергетика*. 2005. № 5. С. 12–18.
4. Смирнов А. В., Баранов Є. Л. Моделювання газодинаміки клапанів. *Промислова енергетика*. 2010. № 3. С. 45–52.
5. Чернишов Д. І. Сучасні методи розрахунку напружено-деформованого стану енергетичного обладнання. *Вісник машинобудування*. 2015. № 8. С. 28–33.
6. Коваленко О. С., Гринько В. П. Вплив конструктивних елементів на роботу клапанів. *Енергетика України*. 2018. № 4. С. 19–25.
7. Литвиненко Ю. А. Комплексне моделювання клапанів для ТЕС. *Проблеми теплотехніки*. 2021. № 2. С. 34–41.
8. Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. *Hemisphere*, 1980. 197 p.
9. Лементар С.Ю Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Моделювання газодинаміки вологої пари в головних паропроводах атомної електростанції. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: технічні науки. 2021. № 5 (32). С. 159-167. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/25>

10. Колядюк А. С. Термоміцність регулюючого клапана парової турбіни : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.09 – динаміка і міцність машин. Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного. Харків, 2021. 168 с.

11. Redlich O., Kwong J. N. S. On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions. *Chemical Reviews*. 1949. Т. 44. № 1. С. 233–244.

12. Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Аналіз підходів до оцінки теплового та напружено-деформованого стану елементів паропроводів АЕС. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. № 30 (69) Частина № 2. С. 12–16.

Rindyuk D.V., Bednarska I.S. INFLUENCE OF STEAM SCREEN ON STRESS-DEFORMED STATE OF CONTROL VALVE

The article investigates the influence of the steam screen on the stress-strain state (SSS) of the K-1000-60/3000 steam turbine control valve, which is an important element of the steam distribution system of nuclear power plants in Ukraine. The reliability and safety of this equipment are critically important, since defects in the metal of the valve body can lead to emergency situations. Modern methods of mathematical modeling were used to analyze gas-dynamic processes and calculate the SS, taking into account the design features of the valve, in particular the steam screen. The modeling was performed using specialized software packages FloEFD and SolidWorks Simulation. Gas-dynamic calculations were performed based on the Navier-Stokes equations for compressible flow, taking into account the laws of conservation of energy, mass and momentum. Taking into account the influence of the steam screen allowed obtaining detailed data on the distribution of pressures, velocities and temperatures inside the valve. The results of the study showed that the steam screen creates local resistance, which significantly affects the uneven distribution of the temperature field and the turbulence of steam flows. The influence of energy dissipation, which is enhanced by the collision of steam flows, on the occurrence of local temperature gradients and stresses, which are one of the reasons for the formation of microcracks in the metal of the valve body, is explained. The analysis demonstrated that ignoring the influence of the steam screen leads to an underestimation of the stress level in the metal cracking zones, which can cause errors in predicting the durability of the equipment. The results obtained confirm the importance of taking into account real structural elements when modeling elements of steam distribution systems. This allows to increase the accuracy of engineering calculations and ensure higher operational reliability of the equipment in the future.

Key words: control valve, steam sieve, stress-strain state, gas-dynamic modeling, operational reliability.