УДК 621.625, 621.438

ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПОТОКУ В РЕГУЛЮЮЧОМУ ВІДСІКУ НОВОГО ТИПУ ЦИЛІНДРА ВИСОКОГО ТИСКУ ПАРОВОЇ ТУРБІНИ

[1] Ю. А. Биков, канд. техн. наук
bykow@ipmach.kharkov.ua
ORCID: 0000-0001-7089-8993

[1] А. В. Русанов,
член-кор. НАН України
rusanov@ipmach.kharkov.ua
ORCID: 0000-0003-1345-7010

[2] В. Л. Швецов, канд. техн. наук
shvetsov@turboatom.com.ua
ORCID: 0000-0002-2384-1780

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

[2] Акціонерне товариство «Турбоатом»,
61037, Україна, м. Харків,
пр. Московський, 199

*Для удосконалення проточної частини регулюючого відсіку та поліпшення енергетичних показників в ІПМаш НАН України розроблено триступеневий регулювальний відсік нового типу для циліндра високого тиску (ЦВТ) парової турбіни К-325-23,5, у якому відсутня камера вирівнювання тиску. Для визначення ефективності газодинамічного удосконалення регулювального відсіку постала задача вивчення просторової структури турбулентного потоку. Для цього було проведено числове моделювання течії пари у режимі з урахуванням парціальності підведення та у номінальному режимі. Основною задачею проведеного числового моделювання було виявлення рівня колової нерівномірності газодинамічних параметрів у перших ступенях відсіку та на виході з нього. Просторові розрахунки течії пари в досліджуваних проточних частинах проводилися за допомогою програмного комплексу **IPMFlow** моделювання просторової турбулентної течії в турбомашинах, розробленого в ІПМаш НАН України. Проведено дослідження нерівномірності потоку пари за колом для режимів 100, 70 і 50% масової витрати пари. Режими 70 і 50% характеризуються двома закритими регулювальними клапанами з чотирьох, що відповідає 37% відкритих міжлопатевих каналів. Наведені результати і аналіз розрахунків трьох режимів у вигляді розподілів масової витрати і тиску в міжвінцевих зазорах і на виході з відсіку. На графіках добре видно, що нерівномірність питомої масової витрати зберігається до останнього ступеня, водночас нерівномірність тиску виявляється незначною для усіх розглянутих режимів. Аналіз результатів моделювання демонструє досить низьку нерівномірність газодинамічних параметрів пари на виході з регулюючого відсіку в режимах з парціальністю та незначну нерівномірність у номінальному режимі. Виходячи з отриманих результатів аналізу зроблено висновок щодо ефективності застосування нового регулювального відсіку ЦВТ під час модернізації парової турбіни К-325-23,5. Для впровадження нової конструкції регулювального відсіку доцільно подальше дослідження рівня нестаціонарних навантажень на лопатки ЦВТ.*

***Ключові слова**: числове моделювання, просторова течія, парова турбіна, регулювальний відсік, циліндр високого тиску.*

Вступ

Більшість парових турбін, включаючи блоки 200 і 300 МВт, що працюють за змінним графіком навантажень, необхідно проектувати для роботи не тільки за повного, але і значно (до 50%) зниженого навантаження. За цих умов раціонально використовувати систему соплового пароросподілу [1]. У таких турбінах всі основні зміни в структурі потоку, пов'язані з режимом роботи, відбуваються в регулюючому відсіку, що складається з першого (регулюючого) і другого (першого ступеня тиску) ступенів, а також розташованої між ними камери вирівнювання тиску. В роботі [2] показано, що розкид відносного повного тиску на виході з регулюючого ступеня (РС) може становити понад 2% для режиму з половиною від номінальної масової витрати. Втрати тиску в зрівняльній камері за РС складуть близько 2% від повного тиску на вході [3].

Для удосконалення проточної частини відсіку РС та поліпшення енергетичних показників в ІПМаш НАН України розроблено триступеневий регулювальний відсік ЦВД парової турбіни К-325-23,5, у якому відсутня змішувальна камера. Для визначення ефективності газодинамічного удосконалення відсіку РС необхідне дослідження просторової структури турбулентного потоку [2], [4], в тому числі з використанням методів математичного моделювання. Для оцінювання нерівномірності тиску та масової витрати за РС було вдосконалено програмне забезпечення комплексу **IPMFlow** [5], розроблене в ІПМаш НАН України для числового моделювання просторових турбулентних течій в енергетичних

© Ю. А. Биков, А. В. Русанов, В. Л. Швецов, 2020

машинах, зокрема в парових турбінах. У програмний комплекс був доданий модуль, що дозволяє будувати розрахункову область з довільною кількістю міжлопатевих каналів із зазначенням кількості та протяжності закритих каналів. Це дозволило моделювати течію в РС з парціальним підведенням пари на всіх режимах роботи турбіни.

В роботі наведені результати числових досліджень течії в регулюючому відсіку парової турбіни за парціального та повного підведення. Метою дослідження було виявити колову нерівномірність тиску та масової витрати пари за регулюючим відсіком та вплив парціальності на нерівномірність потоку.

Об'єкт дослідження

В ІПМаш НАН України розроблено тривимірну модель проточної частини триступеневого регулювального відсіку ЦВД парової турбіни К-325-23,5. Турбіна оснащена сопловою системою регулювання (рис. 1), що означає перекриття певної кількості каналів для кожного режиму роботи. Проточна частина розробленого регулювального відсіку позбавлена камери вирівнювання і складається з трьох ступенів (рис. 1, в), на відміну від вихідної конструкції з двома ступенями (рис. 1, б). ККД остаточного варіанта розробленої проточної частини ЦВД за результатами проведених розрахункових досліджень без урахування відборів пари склав 94,7% на номінальному режимі.

Проведено дослідження нерівномірності потоку пари по колу для режимів 100, 70 і 50% масової витрати пари. Режими 70 і 50% характеризуються двома закритими регулювальними клапанами з чотирьох. Дослідження виконані за допомогою розроблених в ІПМаш НАН України методів і програмних продуктів моделювання 3D течій у проточних частинах енергетичних машин.

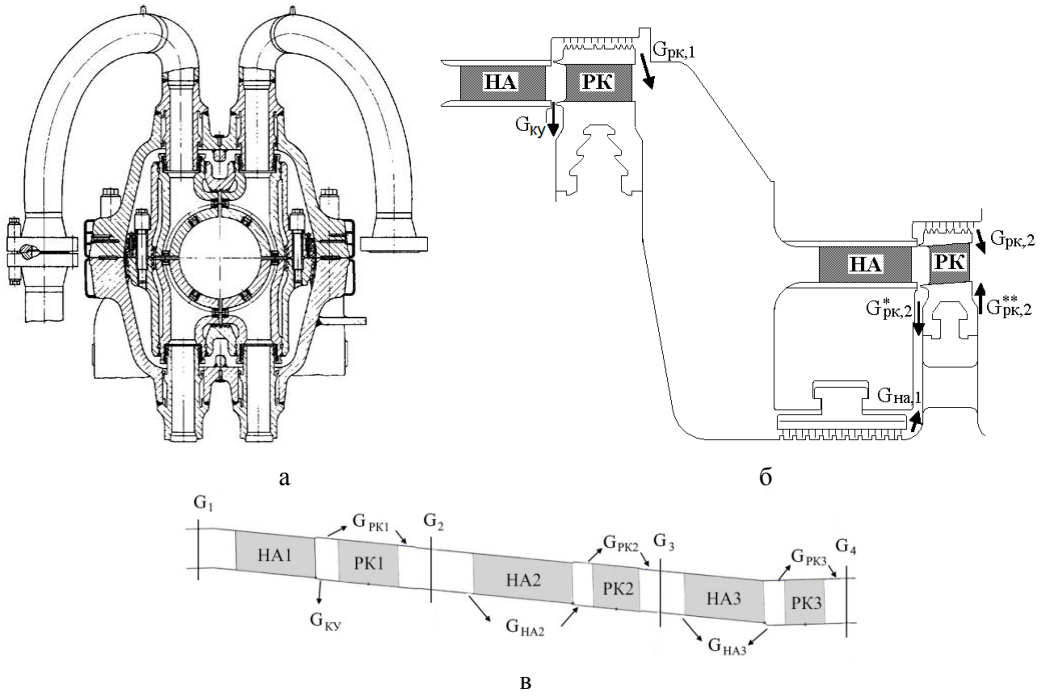


Рис 1. Зовнішній вигляд соплового регулювання турбіни:
а – поперечний переріз системи паровпуску турбіни типу К-300; б – вихідна конструкція РС;
в – нова конструкція РС

Методи досліджень

Просторові розрахунки течії пари в досліджуваних проточних частинах проводилися за допомогою розробленого в ІПМаш НАН України програмного комплексу **IPMFlow** [5] на різницевих сітках Н-типу. Використовувалася модель в'язкої турбулентної течії, що ґрунтується на числовому інтегруванні осередненої системи рівнянь Нав'є-Стокса. Врахування турбулентних явищ здійснювалося за допомогою двопараметричної диференціальної моделі турбулентності SST Ментера [6]. Для опису термодинамічних залежностей використано двочленне рівняння стану Таммана [7].

Результати досліджень

Проточна частина дослідженого регулюючого відсіку складається з трьох ступенів, на відміну від вихідної конструкції з двома ступенями. Досліджено рівень нерівномірності тиску та масові витрати за регулюючим відсіком на режимах 100, 70 та 50% масової витрати. За допомогою розробленого додаткового програмного модуля було побудовано розрахункові області, що відповідають режимам 100% (відкриті всі клапани), та 50–70% (відкрито два клапани, два клапани закрито). На рис. 2 наведено зовнішній вигляд розрахункової області, що використовувалася для обчислення течії в регулюючому відсіку для режиму 100% потужності. Розрахункова область має загальне число елементарних об'ємів (комірок) близько 10 млн.

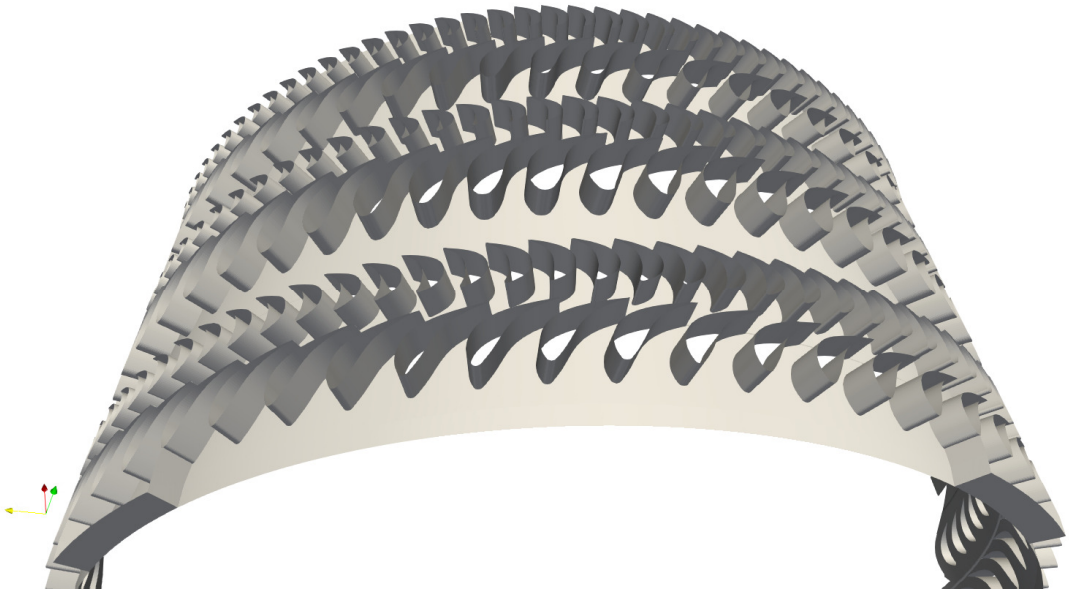


Рис. 2. Зовнішній вигляд розрахункової області

а б

Рис. 3. Конфігурація каналів першого вінця:
а – режим 100%; б – режими 70 та 50%

За допомогою розробленого програмного модуля було побудовано необхідну конфігурацію розрахункової області першого вінця (рис. 3) для моделювання відкритих та закритих клапанів соплової системи регулювання турбомашини для режимів 100% (рис. 3, а) та 70, 50% (рис. 3, б).

Для режимів роботи турбіни, що відповідають 100, 70 та 50% масової витрати пари, встановлювались такі граничні умови: повний тиск на вході 22,73; 22,73; 16,1 МПа, повна температура на вході 808,5 К, статичний тиск на виході 16,578; 11,628; 8,306 МПа відповідно. Для скорочення часу встановлення течії були використані квазінестаціонарні умови на міжвінцевих межах розрахункової сітки, які забезпечують обмін газодинамічними параметрами між вінцями без урахування зміщення у часі вінців один відносно одного.

В результаті числового моделювання отримано розподіл полів тиску та відносної швидкості для режиму 100% масової витрати (рис. 4). На рисунку добре видно, що нерівномірність потоку розповсюджується тільки на перший ступінь регулюючого відсіку.

Також в результаті числового моделювання отримано розподіл полів тиску та відносної швидкості для режиму 70% масової витрати (рис. 5). На рисунку добре видно, що нерівномірність тиску майже зникає на останньому вінці, а нерівномірність витрати розповсюджується й далі за регулюючим відсіком. Також спостерігаються значні вентиляційні потоки в міжвінцевих зазорах робочого колеса першого ступеня.

Зрештою в результаті числового моделювання отримано розподіл полів тиску та відносної швидкості для режиму 50% масової витрати (рис. 6). На рисунку спостерігається картина, подібна до режиму 70%.

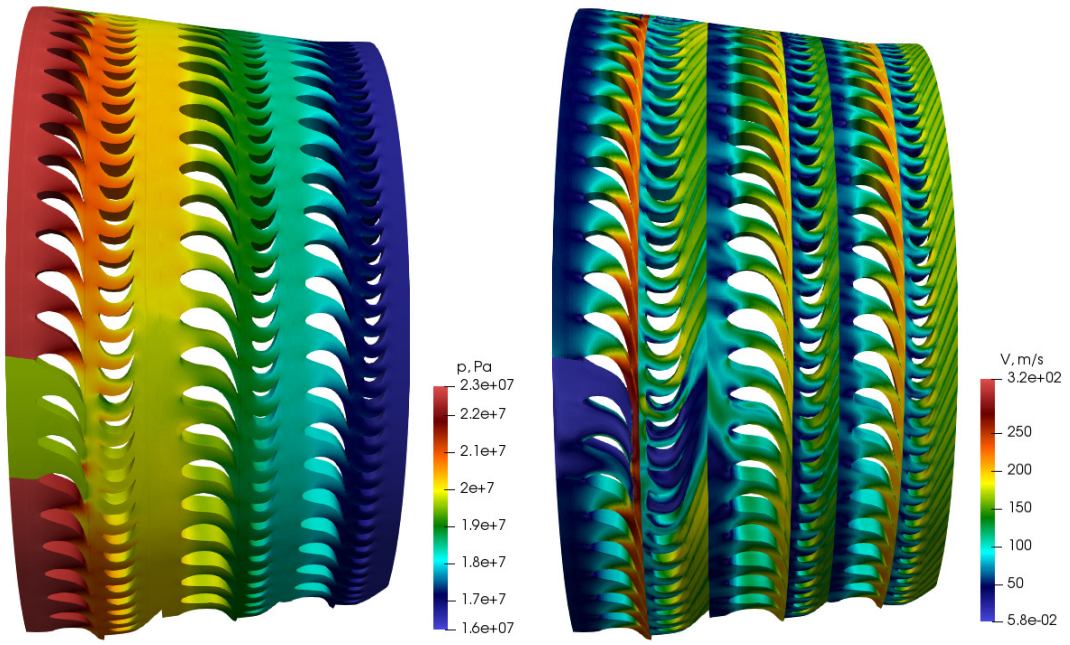
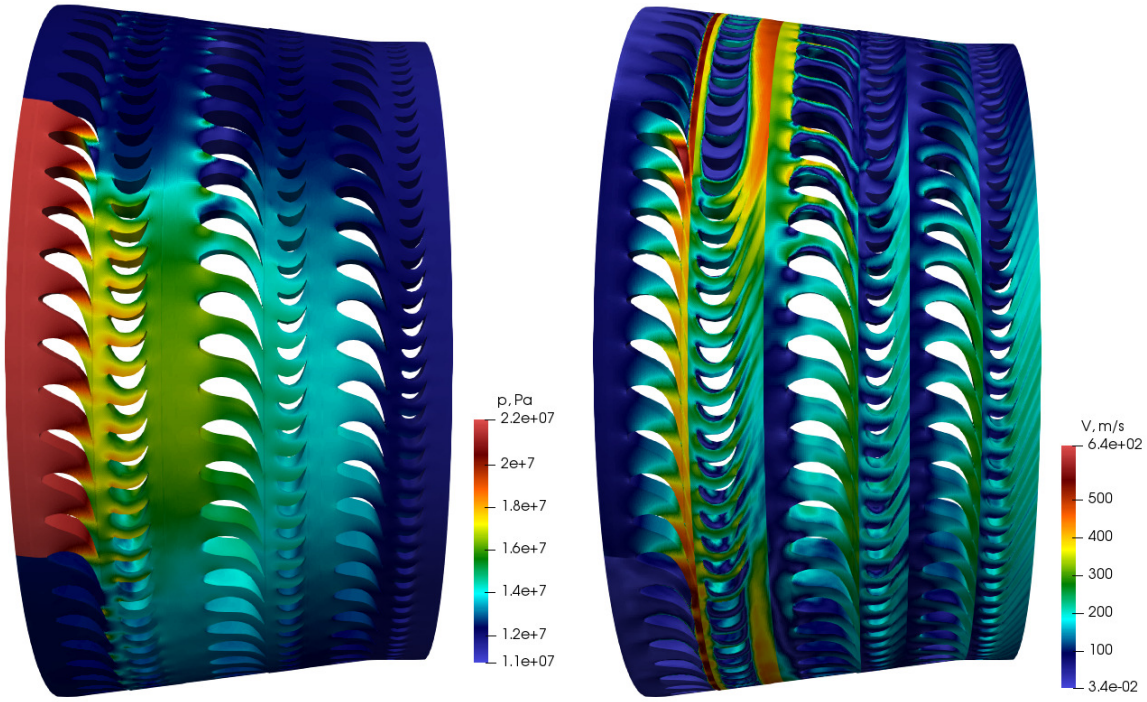
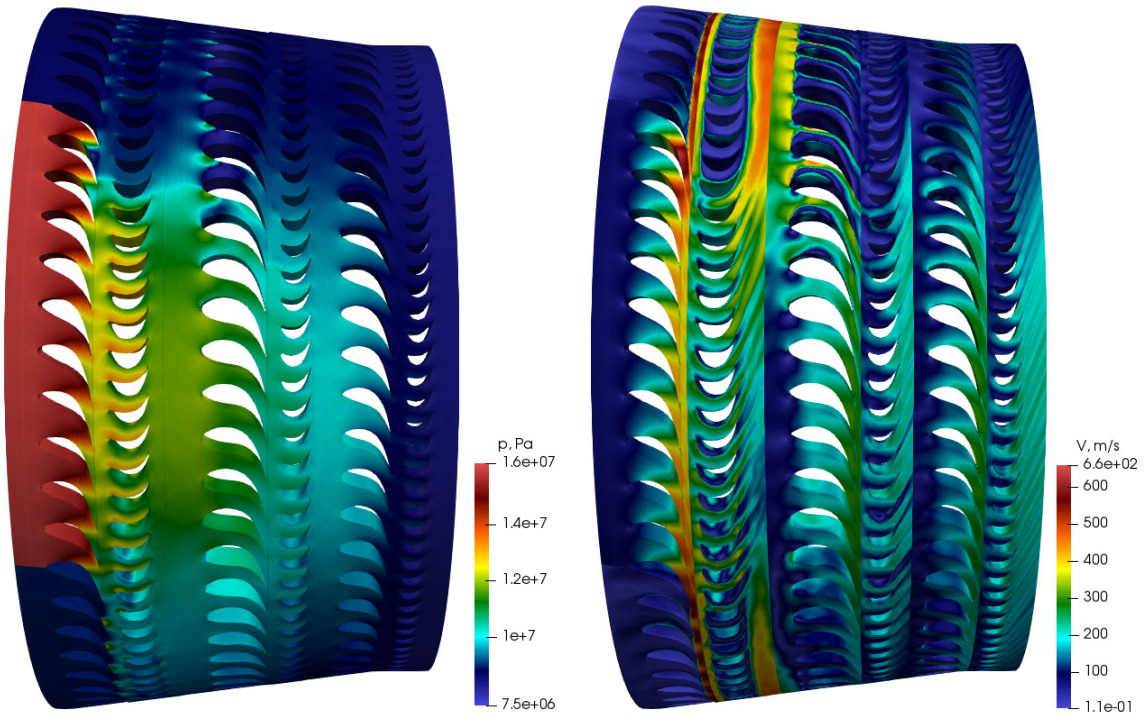


Рис. 4. Розподіл параметрів у розрахунковій області для режиму 100%:
а – тиск; б – відносна швидкість



а б

Рис. 5. Розподіл параметрів у розрахунковій області для режиму 70%:
а – тиск; б – відносна швидкість



а б

Рис. 6. Розподіл параметрів у розрахунковій області для режиму 50%:
а – тиск; б – відносна швидкість

На рис. 7 наведено графіки розподілу тиску вздовж півкола у середньому перерізі за вінцями регулюючого відсіку для режиму 100% потужності. Тут θ – відносне положення вздовж півкола. На графіках добре видно, що в першому ступені нерівномірність досить значна, але на останньому її майже немає.

На рис. 8, 9, 10 наведено графіки розподілу питомої масової витрати вздовж півкола у середньому перерізі за вінцями регулюючого відсіку для режиму 100% потужності. На графіках добре видно, що нерівномірність питомої витрати зберігається до останнього ступеня та досягає мінімального значення 9,2%.

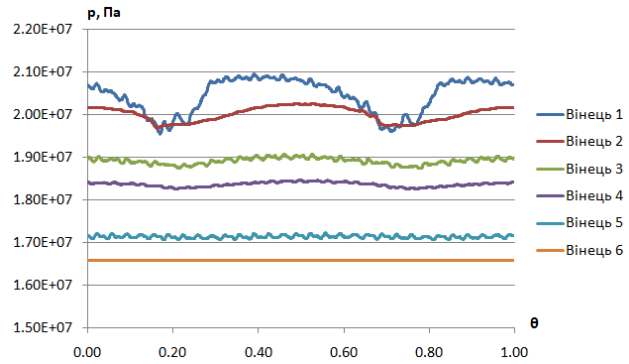


Рис. 7. Коловий розподіл тиску за вінцями регулюючого відсіку, режим 100%

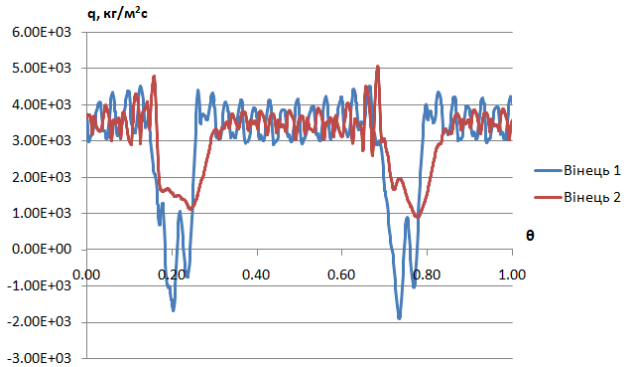


Рис. 8. Коловий розподіл питомої витрати за вінцями № 1, 2 регулюючого відсіку, режим 100%

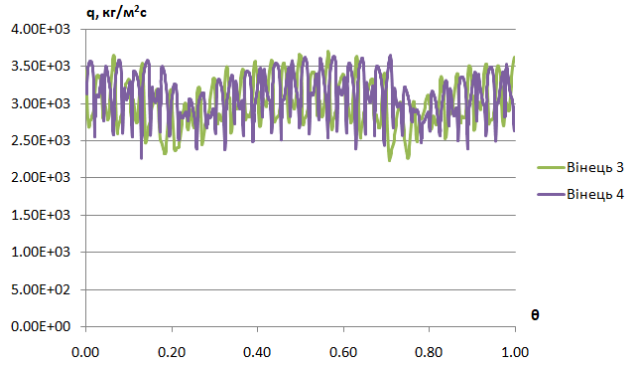


Рис. 9. Коловий розподіл питомої витрати за вінцями № 3, 4 регулюючого відсіку, режим 100%

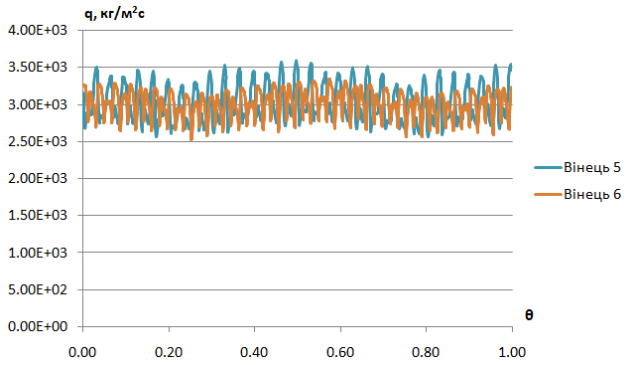


Рис. 10. Коловий розподіл питомої витрати за вінцями № 5, 6 регулюючого відсіку, режим 100%

На рис. 11 наведено графіки розподілу тиску вздовж півкола у середньому перерізі за вінцями регулюючого відсіку для режиму 70% витрати. На графіку добре видно, що у міру проходження потоком вінців нерівномірність тиску поступово зменшується.

На рис. 12, 13, 14 наведено графіки розподілу питомої витрати вздовж півкола у середньому перерізі за вінцями регулюючого відсіку для режиму 70% витрати. На графіках добре видно, що нерівномірність питомої витрати зберігається до останнього ступеня.

На рис. 15 наведено графіки розподілу тиску вздовж півкола у середньому перерізі за вінцями регулюючого відсіку для режиму 50% витрати. На графіку також добре видно, що практично у всіх ступенях є нерівномірність тиску, окрім значень на виході з відсіку, як і для режиму 70%.

На рис. 16, 17, 18 наведено графіки розподілу питомої витрати вздовж півкола у середньому перерізі за вінцями регулюючого відсіку для режиму 50% потужності. На графіках добре видно, що нерівномірність питомої витрати зберігається до останнього ступеня.

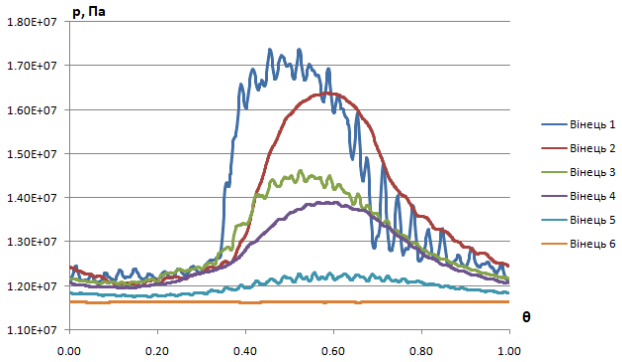


Рис. 11. Коловий розподіл тиску за вінцями регулюючого відсіку, режим 70%

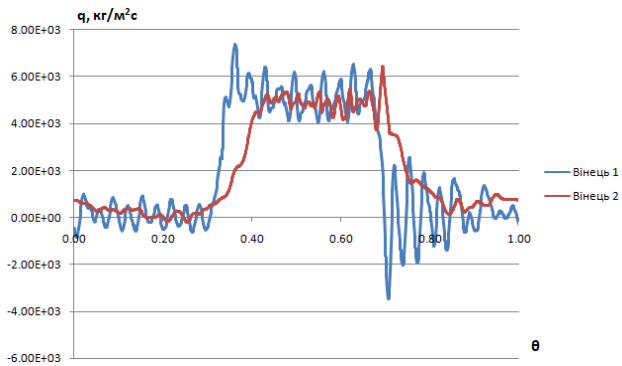


Рис. 12. Коловий розподіл питомої витрати за вінцями № 1, 2 регулюючого відсіку, режим 70%

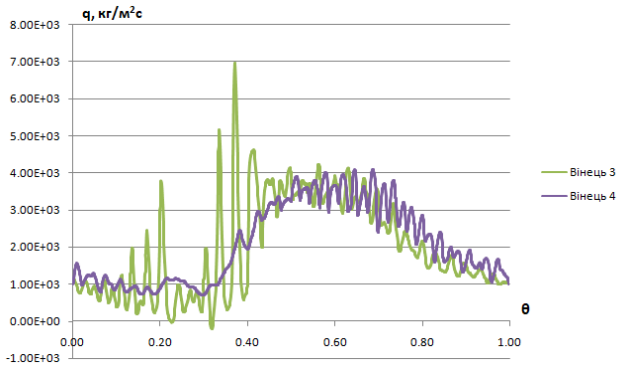


Рис. 13. Коловий розподіл питомої витрати за вінцями № 3, 4 регулюючого відсіку, режим 70%

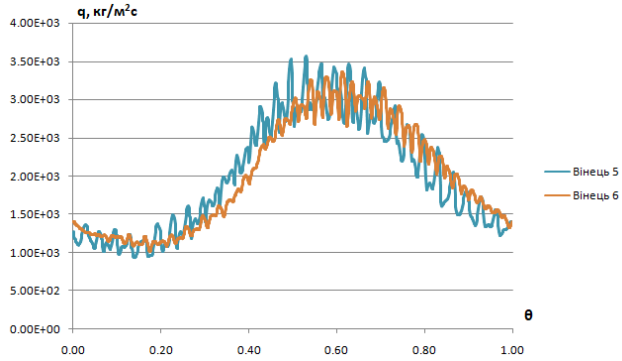


Рис. 14. Коловий розподіл питомої витрати за вінцями № 5, 6 регулюючого відсіку, режим 70%

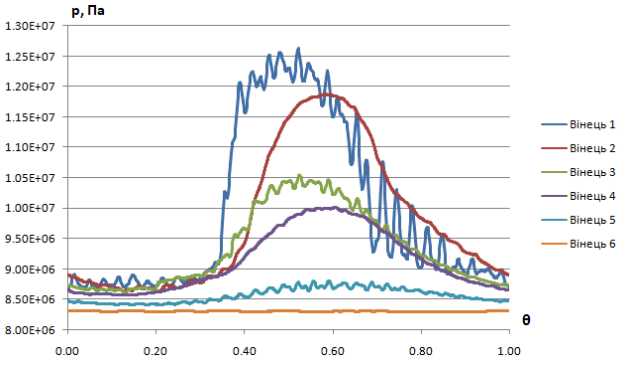


Рис. 15. Коловий розподіл тиску за вінцями регулюючого відсіку, режим 50%

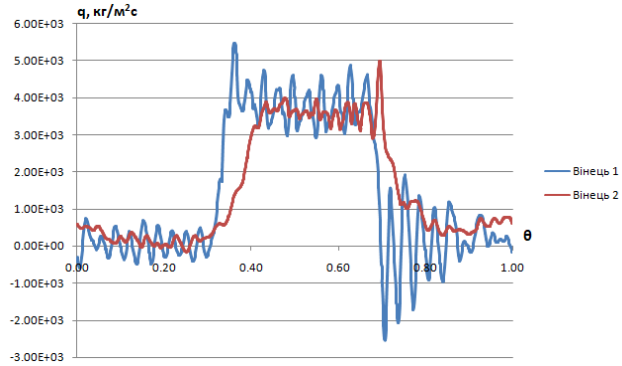


Рис. 16. Коловий розподіл питомої витрати за вінцями № 1, 2 регулюючого відсіку, режим 50%

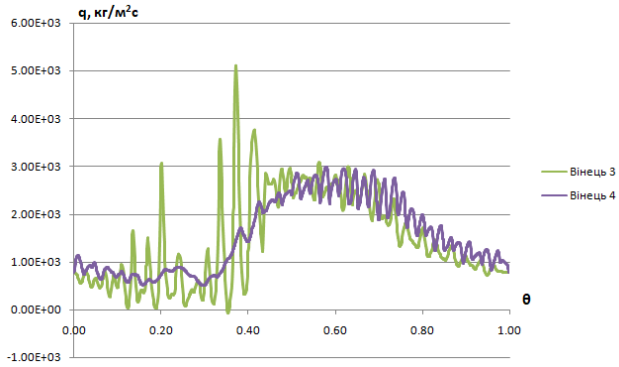


Рис 17. Коловий розподіл питомої витрати за вінцями № 3, 4 регулюючого відсіку, режим 50%

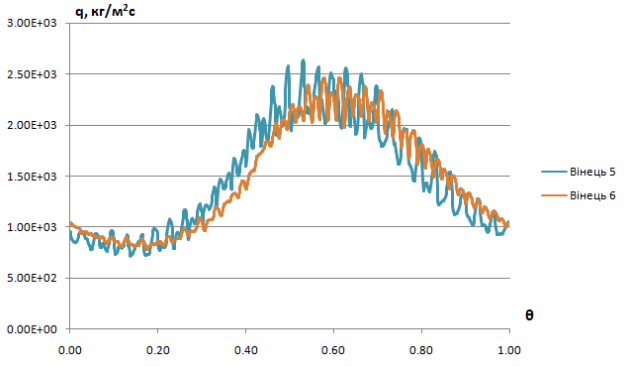


Рис 18. Коловий розподіл питомої витрати за вінцями № 5, 6 регулюючого відсіку, режим 50%

Висновки

Наведені результати і аналіз розрахунків течії пари в регулюючому відсіку парової турбіни К-325-23,5 для трьох режимів роботи у вигляді розподілів масових витрат і тисків в міжвінцевих зазорах і на виході з відсіку. Аналіз результатів моделювання демонструє досить низьку нерівномірність газодинамічних параметрів пари на виході з регулюючого відсіку в режимах з парціальністю та незначну нерівномірність у номінальному режимі. Виходячи з отриманих результатів аналізу зроблено висновок щодо ефективності застосування розробленого регулювального відсіку ЦВТ для модернізації парової турбіни К-325-23,5. Однак для впровадження нової конструкції регулювального відсіку доцільно провести додаткові дослідження нестаціонарних навантажень на соплові та робочі лопатки турбіни, що викликані коловою нерівномірністю газодинамічних параметрів під час парціального підведення.

Наведені результати підтверджують можливості використання вдосконаленого програмного комплексу ***IPMFlow*** для дослідження більш повних особливостей течії в ступенях парових машин, включаючи ефекти, викликані коловими змінами геометрії проточної частини.

Література

1. Щегляев А. В. Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин. М.: Энергоатомиздат, 1993. 416 с.
2. Бойко А. В., Усатый А. П., Авдеева Е. П. Численное исследование эффективности уравнительной камеры за регулирующей ступенью на разных режимах работы. *Вестн. НТУ «ХПИ. Серия: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование.* 2014. № 1 (1044). С. 6–11.
3. Русанов А. В., Косьянова А. И., Косьянов Д. Ю. Исследование структуры потока в регулирующем отсеке ЦВД паровой турбины К-325-23,5 на режиме парциальности 0,4. *Авиац.-косм. техника и технология*. 2015. № 9. С. 75–80.
4. Бойко А. В., Говорущенко Ю. Н., Усатый А. П. Оценка влияния межвенцового зазора на эффективность регулирующей ступени на переменном режиме. *Вестн. НТУ «ХПИ». Серия: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2012. Вып. 7. С. 49–53.
5. Русанов А. В., Ершов С. В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин: монография. Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2008. 275 с.
6. Menter F. R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.* 1994. Vol. 32. No. 8. P. 1598–1605. https://doi.org/10.2514/3.12149.
7. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

Надійшла до редакції 22.05.2020

Численное исследование неравномерности потока в регулирующем отсеке нового типа цилиндра высокого давления паровой турбины

[1] Ю. А. Быков, [1] А. В. Русанов, [2] В. Л. Швецов

[1] Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
61046, Украина, г. Харьков, ул. Пожарского, 2/10

[2] Акционерное общество «Турбоатом»,
61037, Украина, г. Харьков, пр. Московский, 199

Для совершенствования проточной части регулирующего отсека и улучшения энергетических показателей в ИПМаш НАН Украины разработан трехступенчатый регулирующий отсек цилиндра высокого давления (ЦВД) паровой турбины К-325-23,5, в котором отсутствует уравнительная камера. Для определения эффективности газодинамического усовершенствования регулирующего отсека возникла задача изучения пространственной структуры турбулентного потока. Для этого было проведено численное моделирование течения пара в режиме с учетом парциальности подвода и в номинальном режиме. Основной задачей проведенного численного моделирования было выявление степени окружной неравномерности газодинамических параметров в первых ступенях отсека и на выходе из него. Пространственные расчеты течения пара в исследуемых проточных частях проводились с помощью программного комплекса IPMFlow моделирования пространственного турбулентного течения в турбомашинах, разработанного в ИПМаш НАН Украины. Проведено исследование неравномерности потока пара по кругу для режимов 100, 70 и 50% массового расхода пара. Режимы 70 и 50% характеризуются двумя закрытыми регулирующими клапанами из четырех, что соответствует 37% открытых межлопастных каналов. Представлены результаты и анализ расчетов трех режимов в виде распределений массовых расходов и давлений в межвенцовых зазорах и на выходе из отсека. На графиках хорошо видно, что неравномерность удельного расхода сохраняется до последней ступени, в то же время неравномерность давления оказывается незначительной для всех рассмотренных режимов. Анализ результатов моделирования показывает довольно низкую неравномерность газодинамических параметров пара на выходе из регулирующего отсека в режимах с парциальностью и незначительную неравномерность в номинальном режиме. Исходя из полученных результатов анализа сделан вывод о эффективности применения нового регулирующего отсека ЦВД при модернизации паровой турбины К-325-23,5. Для внедрения новой конструкции регулирующего отсека целесообразно дальнейшее исследование уровня нестационарных нагрузок на лопатки ЦВД.

Ключевые слова: *численное моделирование, пространственное течение, паровая турбина, регулирующий отсек, цилиндр высокого давления.*