

О. П. УСАТИЙ, О. П. АВДЄЄВА, І. А. ПАЛЬКОВ, С. А. ПАЛЬКОВ, О. І. ІЩЕНКО

ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ДВОХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ РОБОЧИХ РЕШІТОК ДЛЯ ПЧ ЦВТ ТУРБИНИ К-330-23,5

В статті викладені результати багатопараметричної оптимізації конструкційних і термогазодинамічних параметрів проточної частини ЦВТ К-330-23,5, які отримані за допомогою розробленої САПР «Турбоагрегат». Знайдені 12 оптимальних рішень для проточної частини ЦВТ К-330-23,5 дозволяють не тільки оцінити вплив на ефективність ЦВТ конструкційних параметрів і чисел робочих лопаток ступенів ЦВТ, а і провести порівняльний аналіз двох технологічних підходів виготовлення робочих лопаток – з підрізуванням вихідних кромок і без такої.

Ключові слова: парова турбіна, ефективність, оптимізація, проточна частина, технологія, робочі лопатки, вихідні кромки, ККД.

А. П. УСАТЫЙ, Е. П. АВДЕЕВА, И. А. ПАЛЬКОВ, С. А. ПАЛЬКОВ, О. И. ИЩЕНКО
ОПТИМИЗАЦИЯ И СРАВНЕНИЕ ДВУХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ПЧ ЦВД ТУРБИНЫ К-330-23,5

В статье изложены результаты многопараметрической оптимизации конструкционных и термогазодинамических параметров проточной части ЦВД К-330-23,5, полученные с помощью разработанной САПР «Турбоагрегат». Найденные 12 оптимальных решений для проточной части ЦВД К-330-23,5 позволяют не только оценить влияние на эффективность ЦВД конструкционных параметров и чисел рабочих лопаток ступеней ЦВД, а и провести сравнительный анализ двух технологических подходов изготовления рабочих лопаток – с подрезкой исходных кромок и без таковой.

Ключевые слова: паровая турбина, эффективность, оптимизация, проточная часть, технология, рабочие лопатки, выходные кромки, КПД.

O. USATYI, O. AVDIEIEVA, I. PALKOV, S. PALKOV, O. ISHCENKO
OPTIMIZATION AND COMPARISON OF TWO TECHNOLOGIES FOR THE MANUFACTURE OF BLADES FOR FLOW PATH HPC TURBINE K-330-23.5

The article presents the results of multiparameter optimization of the structural and thermogasdynamic parameters of the flow path of the HPC K-330-23.5, obtained using the developed CAD “Turboagregat”. The found 12 optimal solutions for the flow path of the HPC K-330-23.5 make it possible not only to assess the effect of the design parameters and the number of blades of the HPC stages on the HPC efficiency, but also to carry out a comparative analysis of two technological approaches to manufacturing the rotor blades – with and without trimming the initial edges. Calculations have confirmed the negative effect of increasing the radius of the “tummy” circle on the nature of the flow and on the efficiency of the cascades. In cascades with increased profiles by 9.83 % with a radius of the “tummy” circle, the coefficient of profile losses of the cascade increased by 0.07 % (absolute) in comparison with the original cascade from the original 1MMK-U profiles.

Keywords: steam turbine, efficiency, optimization, flow path, technology, rotor blades, trailing edges, efficiency.

Вступ

Щорічно зростаючий попит на електроенергію є стійким світовим трендом, що вимагає введення нових енергогенеруючих потужностей та модернізації існуючих. Тому задача пошуку нових можливостей збільшення виробництва електроенергії і зменшення собівартості виготовлення енергогенеруючого обладнання є вельми актуальною. В останні роки в Україні збільшення виробництва електричної енергії досягається за рахунок встановлення додаткових потужностей відновлювальної енергетики (СЕС, ВЕС) та покращення показників ефективності, надійності та маневреності енергогенеруючого обладнання традиційної енергетики (АЕС, ТЕЦ, ТЕС), що досягається за рахунок модернізації існуючих потужних парових турбін. Модернізація проточних частин (ПЧ) парових турбін полягає у зміні їх конструкції і поліпшенні технології виготовлення, що забезпечує приріст вироблення електроенергії, збільшення строку експлуатації, покращення показників маневреності та зменшення вартості та терміну проведення модер-

нізації. На сьогодні створення новітніх конструкцій ПЧ з високими показниками якості для модернізації діючого парку парових турбін в стислі терміни неможливе без використання сучасних програмних комплексів з оптимального проектування ПЧ парових турбін. Тому задачі пов'язані з розробкою методології комплексної багатопараметричної і багатокритеріальної оптимізації ПЧ та створенням на її базі відповідних програмних комплексів для оптимального проектування осевих турбін з високими показниками якості мають високий рівень актуальності. Використання таких програмних комплексів забезпечує успішне проведення модернізації існуючого парку турбін в стислі терміни. Розв'язанню зазначених задач присвячено досить багато наукових робіт, в більшості з яких наведені результати пов'язані з вдосконаленням окремих елементів ПЧ турбін [1–2], в яких використовуються різні методи і алгоритми: генетичний алгоритм [3], сурогатне моделювання [4, 5], алгоритм, який моделює поведінку бджолиної сім'ї [6], методи теорії планування експерименту [7]. Подальший пошук резервів підвищення ККД

© О. П. Усатий, О. П. Авдєєва, І. А. Пальков, С. А. Пальков, О. І. Іщенко, 2021

парових турбін можливий тільки при наявності потужних обчислювальних технологій поряд з новими методами і підходами, реалізованими в рамках сучасних систем автоматизованого проектування (САПР). Однією із найпотужніших вітчизняних розробок в цій галузі є створена науковцями кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ» в тісній співпраці з фахівцями АТ «Турбоатом» САПР «Турбоагрегат», в якій реалізовано велику кількість корисних сервісів, що дозволяє ставити та розв'язувати задачі оптимального проектування ПЧ парових турбін в самих різноманітних та надскладних постановках. Разом з тим, всі нові напрацювання в програмних комплексах потребують тестування та перевірки практикою проектування оптимальних конструкцій ПЧ.

Мета роботи

Метою роботи є перевірка нових можливостей розробленого комплексу програмного забезпечення з оптимального проектування ПЧ (САПР «Турбоагрегат») на прикладі створення та порівняння концепт-проектів оптимальних конструкцій ПЧ циліндру високого тиску (ЦВТ) турбіни К-330-23,5 з урахуванням можливості використання різних технологій виготовлення решіток робочих коліс.

Постановка задачі

Весь комплекс розрахункових досліджень в даній роботі був проведений з використанням САПР «Турбоагрегат».

В дослідженнях було використано варіант алгоритму математичної моделі ПЧ «з заданими профілями», що дозволило більш точно визначати геометричні характеристики решіток. Зокрема, до числа таких характеристик, в першу чергу, слід віднести геометричні (скелетні) кути входу робочих і соплових решіток, які істотно впливають на величину додаткових втрат, пов'язаних з ударним натіканням потоку пари на лопатки. Повний опис

Таблиця 2 – Енергетика ступенів конструкції прототипу ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5

Найменування параметру	Номер ступеня турбіни										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Внутрішній відносний ККД ступеня, $\eta_{oiст}$	0,7379	0,7876	0,7987	0,8069	0,8135	0,8167	0,8185	0,8262	0,7486	0,8404	0,8444
Внутрішній відносний ККД ступеня за параметрами гальмування, $\eta_{oiст}^*$	0,7646	0,8160	0,8279	0,8371	0,8442	0,8480	0,8506	0,8595	0,7779	0,8744	0,8794
Окружний ККД, η_u	0,8263	0,8303	0,8395	0,8454	0,8483	0,8491	0,8461	0,8504	0,8515	0,8471	0,8593
Робота на окружності колеса, L_u , ккал/кг	7,96	7,96	7,74	7,62	7,64	7,76	8,11	8,09	8,40	8,58	8,61
Потужність ступеня, $N_{ст}$, Вт	8,75e6	8,83e6	8,61e6	8,51e6	8,56e6	8,73e6	9,15e6	9,16e6	8,68e6	9,09e6	9,18e6

Таблиця 3 – Ефективність решіток профілів конструкції прототипу ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5

Найменування параметру	Номер ступеня турбіни										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Квадрат коефіцієнту швидкості соплових решіток, ϕ^2	0,9303	0,9331	0,9353	0,9379	0,9375	0,9387	0,9400	0,9437	0,9441	0,9430	0,9438
Квадрат коефіцієнту швидкості робочих решіток, ψ^2	0,7942	0,7971	0,8152	0,8262	0,8268	0,8271	0,8211	0,8263	0,8316	0,8267	0,8506

математичної моделі ПЧ «з заданими профілями» наведено в [8].

Для оцінки впливу технологічних аспектів виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток з підрізкою вихідних кромки на ефективність робочих решіток і кінематику потоку за решітками була використана методика, яка розглянута в [9].

Для розв'язання задач оптимального проектування ПЧ була задіяна методика багатопараметричної і багатокритеріальної оптимізації, яка детально описана в [10, 11].

Об'єктом дослідження була проточна частина ЦВТ турбіни К-330-23,5.

На підставі попередніх розрахункових досліджень аеродинамічній ефективності конструкції-прототипу ПЧ ЦВТ К-330-23,5 було виявлено наступне:

1 Проточна частина прототипу ЦВТ К-330-23,5 характеризується досить високим рівнем аеродинамічної досконалості (табл. 1, 2, 3). Разом з тим, потенціал, закладений в конструкцію ПЧ ЦВТ, використовується не повною мірою.

2 Встановлено основні причини, що не дозволяють домогтися більш повного використання можливостей конструкції ПЧ ЦВТ К-330-23,5 в плані підвищення її аеродинамічній ефективності. До них, перш за все, слід віднести:

– істотну невідповідність геометричних кутів входу робочих решіток і кутів натікання потоку робочого тіла на них;

– посилюючий негативний ефект від спільного впливу удару в «животик» і досить високих значень відносних кроків робочих решіток;

– наявність значного впливу зменшення ефективності робочих решіток на збільшення втрат від прикореневих і надбандажних протікань.

Таблиця 1 – Загальні характеристики ПЧ прототипу ЦВТ турбіни К-330-23,5

Найменування параметру	Значення
Внутрішній відносний ККД циліндру, η_{oi}	0,8162
Потужність циліндру, $M_{цил}$, Вт	9,725e7

Оптимізація параметрів ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5

Оптимальне проєктування з метою підвищення ефективності ПЧ вимагає розробки спеціального плану чисельних досліджень. З одного боку даний план має забезпечити знаходження найбільш ефективної конструкції ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5. З іншого боку він має забезпечити отримання достатнього обсягу інформації для проведення аналізу і оцінки впливу на ефективність ПЧ основних параметрів і технологічних рішень, зазначених в технічному завданні до роботи з оптимізації параметрів турбіни. У зв'язку з цим, чисельні дослідження з визначення оптимальних параметрів ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5 були побудовані наступним чином. В першу чергу була розв'язана задача визначення оптимальних параметрів ПЧ з використанням дворівневого рекурсивного алгоритму оптимізації. При розв'язанні цієї задачі всі робочі решітки формувалися з профілю 1ММК [10] з потовщеною вихідною кромкою і збільшеним радіусом кола «животика». На першому рівні оптимізації визначалися оптимальні значення висот соплових і робочих лопаток при постійному кореневому діаметрі, а також кути установок соплових і робочих профілів.

При цьому забезпечувалося виконання обмежень зазначених у технічному завданні до оптимального проєктування конструкції ПЧ ЦВТ:

1 Параметри робочого тіла перед і за циліндром дорівнювали відповідним параметрам прототипу.

2 Кореневі діаметри соплових апаратів і робочих коліс залишалися незмінними і відповідали діаметрам конструкції ПЧ прототипу ЦВТ турбіни К-330-23,5.

3 Тиск пари в місці відбору за 8(9)-м ступенем не відхиляється більше 0,1 МПа від цього параметра в конструкції-прототипу.

4 Профілі соплових апаратів кожного ступеня і числа соплових лопаток відповідали конструкції прототипу.

На другому рівні оптимізації визначалися оптимальні числа робочих лопаток. Відповідно до схеми параметризації змінних 1-го рівня оптимізації, безпосередньо були оптимізовані 18 параметрів і не прямо ще 15 параметрів. Крім того, за допомогою спеціального алгоритму автоматичної побудови обводів ступенів ПЧ для кожної зміни висот робочих лопаток у процесі оптимізації визначалися відповідні їм значення висот лопаток соплового апарату (11 параметрів). Таким чином, перший рівень оптимізації дозволяє знайти оптимальне співвідношення 44 конструкційних параметрів ЦВТ. Другий рівень забезпечує знаходження ще 11 оптимальних значень (чисел робочих лопаток). Разом, в результаті розв'язання дворівневої задачі були визначені оптимальні поєднання

значень 55 параметрів, які впливають на ефективність ПЧ.

Отримана в результаті розв'язання дворівневої оптимізаційної задачі форма обводів ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5, в **подальших дослідженнях була використана як базова**. Мається на увазі, що розв'язання оптимізаційних задач даного дослідження в інших постановках здійснювалося з незмінними середніми діаметрами і висотами соплових та робочих лопаток, значення яких були визначені в результаті розв'язання описаної вище дворівневої оптимізаційної задачі. Інша частина розробленого плану досліджень призначена для розв'язання наступних двох задач.

Мета першої задачі полягає в оцінці та аналізі впливу на результати оптимізації технологічних аспектів виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток. Розв'язання даної задачі має надати інформацію про ступінь впливу підрізки вихідних кромок робочих лопаток на ефективність ПЧ і забезпечити проведення порівняльного аналізу двох підходів виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток – з підрізкою вихідних кромок і без підрізки.

В першу групу, як зазначалося раніше, були включені оптимізаційні задачі з визначення оптимальних кутів установки соплових і робочих решіток. Дані задачі розв'язувалися з використанням в робочих решітках профілів 1ММК зі збільшеним радіусом кола «животика». В даному випадку при модифікації (збільшенні радіусу кола «животика») вихідного профілю 1ММК переслідувалися дві мети:

1 Дотримання прийнятої в АТ «Турбоатом» технології виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток.

2 Прагнення до мінімально можливої зміни форми каналів решітки, порівняно з формою каналів, утворених профілем 1ММК, тобто **до мінімально необхідного збільшення радіусу кола «животика»**.

У **другій групі** оптимізаційних задач використовувався робочий профіль 1ММК, у якого радіус кола «животика» практично не відрізнявся від аналогічного радіусу вихідного профілю. Зазначені відмінності були мінімальні і викликані необхідністю сполучення кола «животика» з колами вхідної і потовщеною вихідною кромками профілю.

Використання такого профілю при існуючих технологічних параметрах виробництва не дозволяє отримувати цільнофрезеровані робочі лопатки без підрізки вихідних кромок.

Обводи профілів 1ММК, що застосовуються при розв'язанні оптимізаційних задач першої і другої груп, наведені на рис. 1–2. На наведених рисунках усі розміри масштабовані до хорди профілю, яка дорівнює 100 мм.

Слід відзначити, що модифіковані варіанти профілів (рис. 1, 2) характеризуються мінімально достатнім відхиленням радіусів кіл «животика».

Безумовно, використання профілів з меншими відхиленнями своїх геометричних характеристик від параметрів оригінальних та атласних профілів виглядає більш обґрунтованим, оскільки так досягатиметься мінімальна зміна форми каналів решітки що, відповідно дозволить досягти мінімального зниження їхньої ефективності в порівнянні з оригінальними і атласними профілями. Необхідно також враховувати, що в моделі розрахунку ПЧ «з заданими профілями» величина підрізки кромки в окружному напрямку визначається автоматично в залежності від кута установки профілю. При цьому врахування впливу підрізки на ефективність робочої решітки відбувається тільки в тому випадку, якщо величина підрізки більше радіусу вихідної кромки профіля, інакше вважається, що підрізка відсутня.

В зазначених вище двох групах оптимізаційних задач кожен з шести варіантів ПЧ вирізнявся кількістю робочих лопаток ступенів. У першому варіанті кількість робочих лопаток кожного ступеня приймалося рівним кількості лопаток прототи-

пу ЦВТ К-330-23,5. У кожному з наступних варіантів кількість робочих лопаток збільшувалася на дві порівняно з попереднім варіантом оптимального рішення.

Таким чином, співставлення одноваріантних оптимальних конструкцій ПЧ з двох груп дозволило провести порівняльний аналіз впливу на ефективність оптимальних ПЧ технологічних аспектів виробництва цільнофрезерованих робочих лопаток.

Крім того, отримані результати допомогли визначитися з перевагами і недоліками кожного з технологічних підходів виготовлення робочих лопаток (з підрізкою вихідних кромek або без підрізки).

Аналіз рішень всередині кожної групи дозволив оцінити ступінь впливу чисел робочих лопаток на вибір оптимальних параметрів ПЧ ЦВТ К-330-23,5 і на її ефективність. В цілому, розв'язання 12 оптимізаційних задач відповідно до розглянутого вище плану численних досліджень дозволило отримати достатній обсяг інформації для техніко-економічного аналізу і вибору оптимального варіанту ПЧ ЦВТ К-330-23,5.

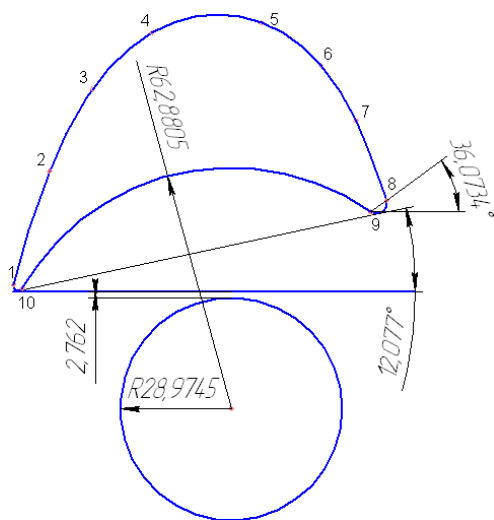


Рис. 1 – Геометрія профілю 1ММК-У для перших трьох варіантів оптимальних конструкцій ПЧ першої групи

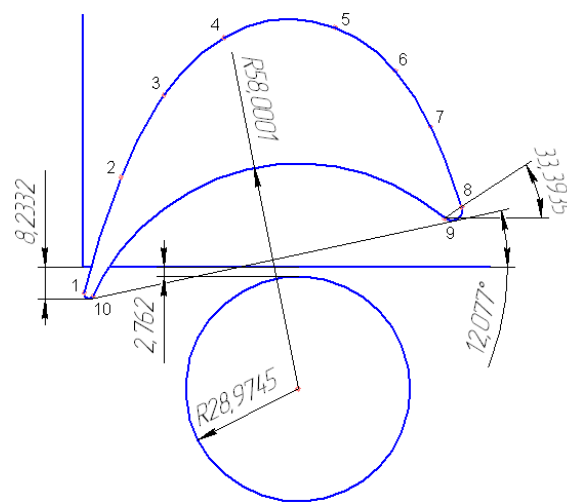


Рис. 2 – Геометрія профілю 1ММК для всіх варіантів оптимальних конструкцій ПЧ другої групи

Результати досліджень

Порівняльний аналіз оптимальних конструкцій першої групи ПЧ ЦВТ К-330-23,5

Даний аналіз базується на порівнянні параметрів конструкції і параметрів, які характеризують ефективність різних варіантів проточних частин ЦВТ К-330-23,5. Порівнюються відповідні характеристики проточних частин циліндра прототипу і шести оптимальних варіантів ПЧ першої групи. Так на рис. 3 показано вплив числа робочих лопаток на ефективність оптимальних варіантів ПЧ, а на рис. 4 наведено приріст економічності оптимальних варіантів у порівнянні з ПЧ прототипу ЦВТ К-330-23,5.

З рис. 3 і 4, видно, що при оптимізації параметрів ПЧ з числами робочих лопаток кожного ступеня, збільшеними на 6 шт. (варіант 4), отримується суттєвий приріст економічності (більше 5 %), максимальний ефект – при збільшенні числа робочих лопаток на 10 шт. (варіант 6).

З рис. 3 і 4, видно, що при оптимізації параметрів ПЧ з числами робочих лопаток кожного ступеня, збільшеними на 6 шт. (варіант 4), отримується суттєвий приріст економічності (більше 5 %), максимальний ефект – при збільшенні числа робочих лопаток на 10 шт. (варіант 6).

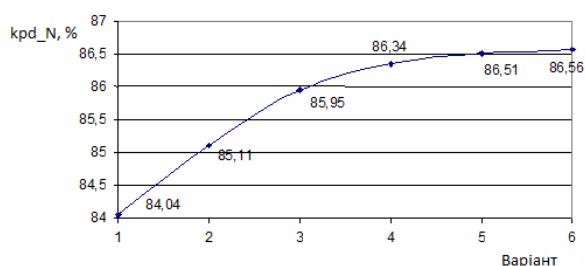


Рис. 3 – Вплив зміни чисел робочих лопаток на ефективність оптимальних ПЧ ЦВТ К-330-23,5

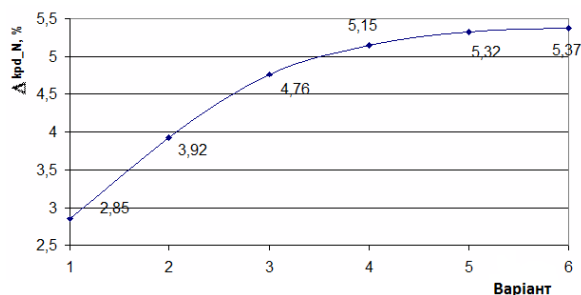


Рис. 4 – Приріст ефективності оптимальних ПЧ ЦВТ К-330-23,5 в порівнянні з конструкцією ПЧ АТ «Турбоатом»

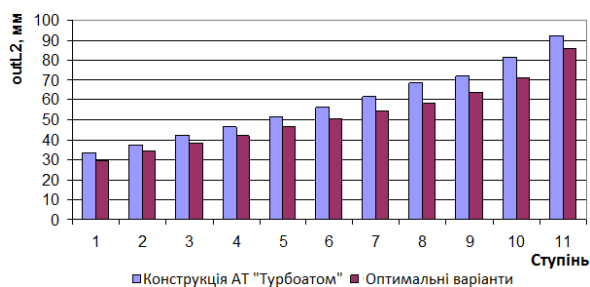


Рис. 5 – Порівняння висот робочих лопаток по вихідним кромкам у ПЧ ЦВТ К-330-23,5 конструкції АТ «Турбоатом» і оптимальних варіантів ПЧ

З рис. 5 видно, що оптимізація обводів ПЧ привела до зменшення висот лопаток всіх ступенів. В першу чергу, це викликано тим, що зменшення висот лопаток в порівнянні з прототипом не потребує збільшення розмірів корпусу ЦВТ і гарантує можливість їх розміщення в існуючому корпусі. Крім того, зазначене зниження жорсткості обмежень дозволило отримати додатковий вигрощ в економічності ПЧ ЦВТ К-330-23,5 близько 1,8%–2,2%. В основному це були дві головні причини, через які було прийнято рішення про зниження жорсткості обмежень на зміну висот лопаток.

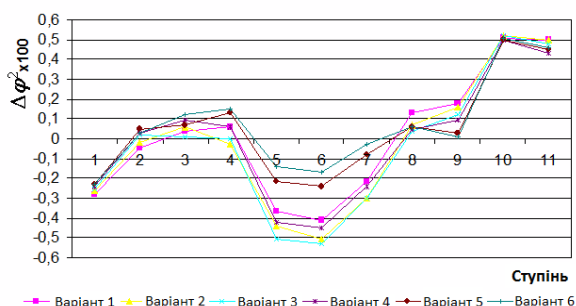


Рис. 6 – Різниця квадратів коефіцієнтів швидкості СР вихідного і оптимальних варіантів ПЧ

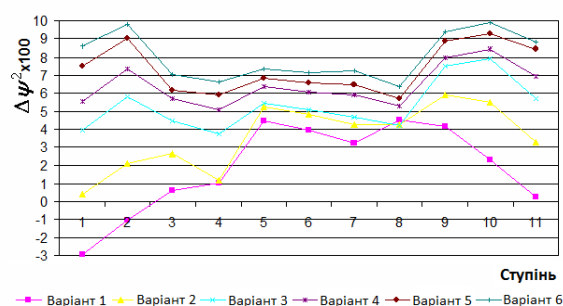


Рис. 7 – Різниця квадратів коефіцієнтів швидкості РР вихідного і оптимальних варіантів ПЧ

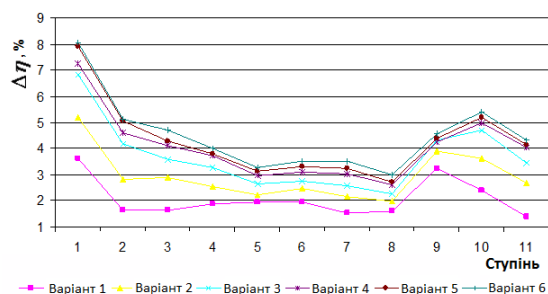


Рис. 8 – Різниця внутрішніх відносних ККД ступенів вихідного і оптимальних варіантів ПЧ

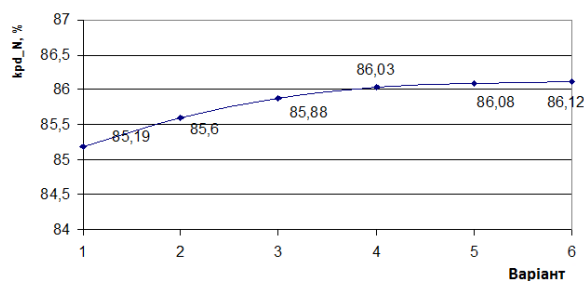


Рис. 9 – Вплив зміни чисел робочих лопаток на ефективність оптимальних ПЧ ЦВТ К-330-23,5 другої групи

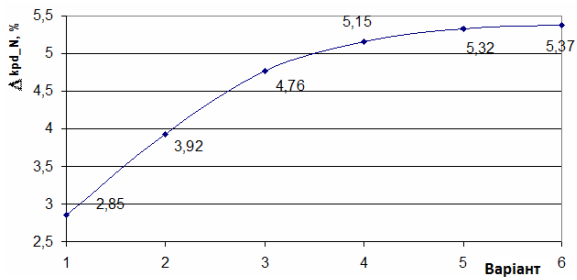


Рис. 10 – Приріст ефективності оптимальних ПЧ ЦВТ К-330-23,5 в порівнянні з конструкцією ПЧ АТ «Турбоатом»

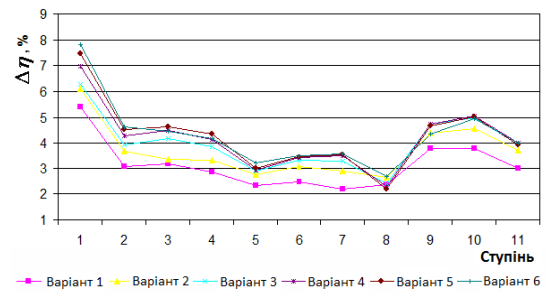


Рис. 11 – Різниця внутрішніх ККД ступенів вихідного і оптимальних варіантів другої групи

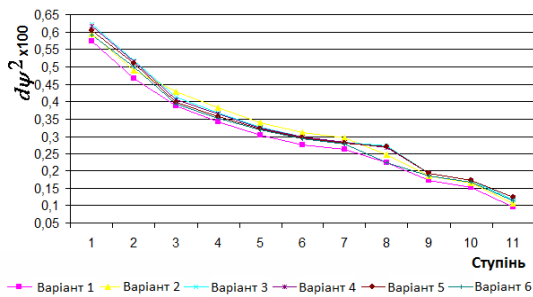


Рис. 12 – Додаткові втрати від підрізки вихідних кромок робочих лопаток в ступенях оптимальних варіантів

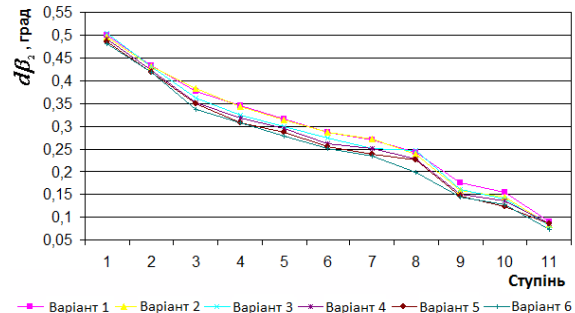


Рис. 13 – Зміна кутів виходу потоку від підрізки вихідних кромок РЛ в ступенях оптимальних варіантів

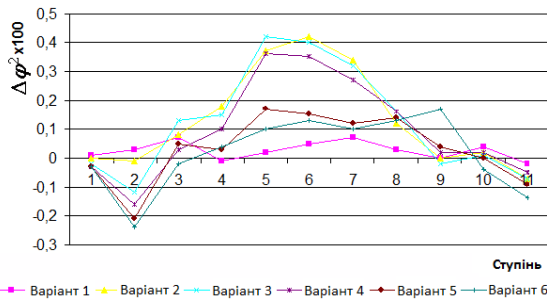


Рис. 14 – Різниця квадратів коефіцієнтів швидкості соплових решіток ЦВТ К-330-23,5 другої та першої груп

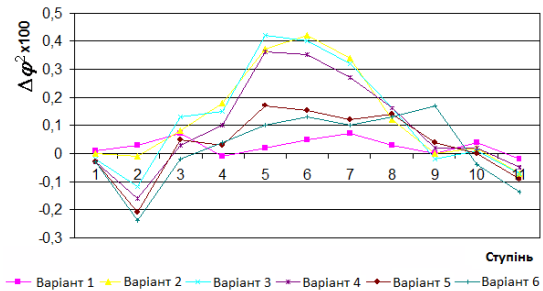


Рис. 15 – Різниця квадратів коефіцієнтів швидкості робочих решіток ЦВТ К-330-23,5 другої та першої груп

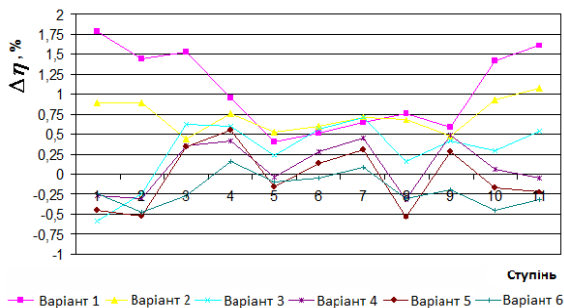


Рис. 16 – Різниця внутрішніх ККД ступенів ПЧ ЦВТ К-330-23,5 другої та першої груп

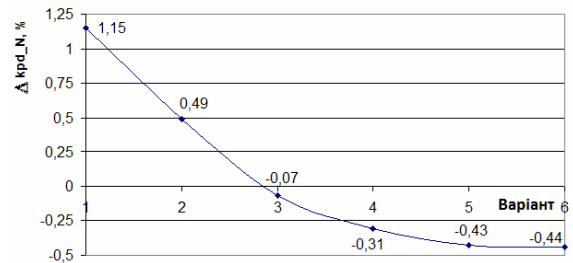


Рис. 17 – Різниця внутрішнього відносного ККД відповідних варіантів ПЧ ЦВТ К-330-23,5 другої та першої груп

На рис. 6–8 порівнюються основні характеристики ефективності проточної частини ЦВТ К-330-23,5 конструкції-прототипу з аналогічними параметрами результатів розв'язання шести задач оптимального проектування ПЧ.

Як відзначалося раніше, одним із шляхів більш повного використання потенціалу ЦВТ К-330-23,5 є зниження втрат енергії в робочих решітках (в тому числі і за рахунок зменшення втрат, пов'язаних з ударним натіканням). Відповідно до цього, отримані оптимальні варіанти ПЧ, характеризуються значно меншими геометричними кутами входу робочих решіток.

Такі рішення дозволили істотно зменшити кути ударів натікаючого потоку і, тим самим, підвищити ефективність робочих решіток на 5 %–10 % (рис. 7).

Разом з тим, необхідно відзначити, що кути ударів натікаючого потоку на соплові решітки в деяких ступенях (трьох з одинадцяти) дещо зросли і загальний рівень втрат у цих соплах незначно збільшився (рис. 6). Не зважаючи на це, загальний позитивний ефект від зниження втрат при ударі натікаючого потоку і підвищення ефективності робочих решіток та викликано, в тому числі цією причиною, зниження прикореневої та радіальної протічки, дозволило істотно підняти рівень внутрішнього відносного ККД ступенів і загальний рівень ефективності оптимальних варіантів ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5 (рис. 5, 9).

Порівняльний аналіз оптимальних конструкцій другої групи ПЧ ЦВТ К-330-23,5

При розв'язанні оптимізаційних задач другої групи, як зазначалося вище, використовувалися робочі решітки, побудовані на базі оригінального профілю ІММК-У, а лопатки виконані із симетричною підрізкою вихідних кромок з торців [12].

В даному пункті порівнюються основні характеристики проточних частин ЦВТ К-330-23,5 і шести його оптимальних варіантів з другої групи. Як зазначалося вище, основні відмінності між умовами отримання оптимальних рішень першої та другої груп полягають в моделюванні двох підходів (технологій) виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток. При отриманні оптимальних рішень першої групи ПЧ моделювалася технологія виготовлення робочих лопаток без підрізання вихідних кромок, а для другої групи – з підрізкою вихідних кромок.

На рис. 9 показано вплив числа робочих лопаток на ефективність оптимальних варіантів ПЧ, а на рис. 10 наведено приріст економічності оптимальних варіантів другої групи в порівнянні з ПЧ ЦВТ К-330-23,5 конструкції-прототипу. Також, як і для оптимальних конструкцій першої групи ПЧ істотним приростом ефективності характеризується *варіант 4* другої групи (понад 4,5 %). У той же час максимальний ефект досягається при збіль-

шенні числа робочих лопаток кожного ступеня на 10 шт. (*варіант 6* другої групи).

На рис. 11–13 порівнюються основні геометричні параметри і характеристики ефективності проточної частини прототипу ЦВТ К-330-23,5 з аналогічними параметрами, отриманими в результаті розв'язання шести задач оптимального проектування ПЧ другої групи.

В отриманих оптимальних конструкціях ПЧ ЦВТ другої групи досягнуті найменші значення кутів удару натікаючого потоку на робочі решітки, що призвело (не дивлячись на наявність додаткових втрат від підрізування вихідних кромок, особливо для перших двох варіантів), до суттєвого підвищення ефективності ПЧ.

Цей факт ґрунтується на реальних фізичних особливостях обтікання активних решіток з високими значеннями відносних кроків [9], для яких в зоні великих кутів удару залежність втрат енергії від цих кутів характеризується дуже високими значеннями і градієнтом. В цьому випадку заходи, спрямовані на зменшення кутів удару натікаючого потоку на робочі колеса, вносять більш істотний внесок в підвищення ефективності ПЧ, ніж негативний вплив додаткових втрат, викликаних підрізкою вихідних кромок робочих лопаток. У той же час, в зоні оптимальних відносних кроків робочих решіток (*варіанти 4–6* другої групи) позитивний ефект від зменшення кутів удару має менш істотне значення. При цьому рівень втрат від підрізки вихідних кромок змінюється від варіанту до варіанту ПЧ ЦВТ досить слабо і має практично дуже близькі значення у відповідних ступенях (рис. 12). Внаслідок цього, зі збільшенням чисел робочих лопаток і переходом в зону, близьку до оптимальних значень відносних кроків, ступінь приросту ефективності оптимальних варіантів ПЧ ЦВТ К-330-23,5 знижується.

Слід відзначити, що зменшення значення кутів удару натікаючого потоку були отримані, в тому числі, і завдяки використанню в робочих решітках оригінальної форми профілю ІММК, у якого геометричний кут входу (β_{1go}) має менше значення в порівнянні з аналогічним кутом (β_{1gy}) профілів зі збільшеними значеннями радіусів кіл «животика».

Крім того, необхідно звернути увагу на суттєве відхилення кутів виходу потоку з робочих коліс в порівнянні з ефективними кутами решіток і на рівень додаткових втрат, викликаних урахуванням впливу підрізування вихідних кромок робочих лопаток (рис. 12 і 13).

Найбільш сильний вплив підрізування вихідних кромок здійснює на ефективність перших ступенів ПЧ (з досить короткими лопатками). Очевидним є і той факт, що оптимізація ПЧ при інших значеннях висот підрізування вихідних кромок призведе до результатів, які будуть в більшій чи меншій мірі відрізнятися від даних, наведених вище. У

зв'язку з цим, міркування і пояснення, зроблені вище, є в повній мірі справедливими тільки для оптимальних конструкцій ПЧ ЦВТ К-330-23,5, висота підрізування вихідних кромок робочих лопаток яких, дорівнює 1,2 мм.

Оцінка впливу технології виготовлення цільнофрезерованої робочих лопаток на оптимальні рішення для ПЧ ЦВТ К-330-23,5 (відмінності між оптимальними конструкціями першої і другої груп ПЧ ЦВТ К-330-23,5). Далі проводиться поваріантний порівняльний аналіз оптимальних рішень першої та другої груп для ПЧ ЦВТ К-330-23,5. В першу чергу порівнюються геометричні характеристики, відмінності яких привели до істотної зміни параметрів ефективності ПЧ.

На рис. 14–16 представлені різниці відповідних параметрів ступенів проточних частин другої і першої груп. Як зазначалося в попередньому разі, практично у всіх ступенів всіх варіантів ПЧ другої групи геометричні кути входу робочих решіток менше відповідних кутів робочих решіток ПЧ першої групи. Особливо помітна різниця цих кутів для перших варіантів ПЧ ЦВТ. При цьому варіант ПЧ другої групи, в робочих решітках якого застосовані оригінальні профілі ІММК-У, а робочі лопатки виконані з підрізкою вихідних кромок, має вигравш ККД в 1,15 % (рис. 17) у порівнянні з відповідним варіантом ПЧ з першої групи.

Цей вигравш досягнуто, в основному, за рахунок зменшення геометричних кутів входу і, як наслідок, зменшення втрат від удару натікаючого потоку. Зазначене збільшення ККД, і одна з основних причин, що забезпечила це збільшення, досить добре пояснюються рис. 14–16. Якщо ефективність соплових решіток перших варіантів ПЧ дуже близькі (рис. 17), то ефективність робочих решіток першого варіанту ПЧ другої групи істотно вище ефективності відповідних решіток ПЧ першої групи оптимальних рішень. Таким чином, очевидним стає факт можливості отримання високоефективних рішень для ПЧ ЦВТ з високонавантажених ступенями, в яких використовуються робочі решітки з істотно збільшеними відносними кроками (малою кількістю робочих лопаток).

Для таких випадків доцільним є застосування в робочих решітках профілів (наприклад, ІММК-У) оригінальної форми, а лопатки допускається виконувати з підрізкою вихідних кромок. При прийнятті рішення про вибір варіанту виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток необхідно розуміти механізм впливу підрізки вихідних кромок на фізичні процеси в ступені і про тісний зв'язок геометрії робочих і соплових решіток з параметрами, що визначають розміри підрізки. Так, безумовно, очевидним є факт негативного впливу на ефективність робочих решіток наявності підрізки вихідних кромок (рис. 12). Однак, крім прямого негативного впливу підрізки вихідної кромки на ефективність робочої решітки високо-

навантажених ступенів турбіни, одночасно виникає ряд факторів, які непрямою чиною також ведуть до додаткового зниження її ефективності.

Непрямий негативний вплив підрізання вихідних кромок на якість робочої решітки високонавантажених ступенів обумовлений, в першу чергу, наявністю прямої залежності збільшення кута виходу потоку з решітки від розмірів підрізки вихідних кромок. Зазначений факт збільшення кута виходу потоку, при інших рівних умовах, однозначно призведе до збільшення витрат робочого тіла через розглянуту решітку. Компенсація збільшення витрати і приведення його до рівня, відповідного заданій витраті в голову циліндру, може бути здійснено (при збереженні обводів ПЧ) принаймні трьома способами: зменшенням ефективного кута виходу робочої решітки (збільшення кута установки робочих профілів); зменшенням ефективного кута виходу соплової решітки; одночасним узгодженням зменшення ефективних кутів виходу соплової і робочої решіток. Будь-який з зазначених способів відповідного зменшення витрати робочого тіла через ступень призводить до збільшення кута удару натікаючого потоку на робочу решітку. Перший спосіб забезпечується збільшенням кута установки робочих профілів. Таке рішення призводить до відповідного збільшення геометричного кута входу решітки і, як наслідок, збільшення кута удару і збільшення, пов'язаних з ним додаткових втрат в решітці.

Використання другого способу призведе до зменшення кута входу потоку в робочу решітку, що в високонавантажених ступенях також пов'язано зі збільшенням кута удару і, відповідно, зі збільшенням втрат в робочій решітці.

При застосуванні технології виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток з підрізкою вихідних кромок дуже важливою обставиною, що впливає на ефективність робочих решіток і всієї ПЧ, є розміри підрізок. Причому, зменшення розмірів підрізки, як було зазначено вище, дозволить знизити не тільки їх прямий негативний вплив, але, і призведе до зменшення кутів удару натікаючого потоку на робочі решітки та пов'язаних з цим явищем додаткових втрат енергії. Зазначені особливості впливу розмірів підрізки вихідних кромок робочих лопаток на ефективність ПЧ є особливо актуальними для високонавантажених ступенів, що мають завищені значення відносних кроків робочих решіток.

В інших випадках, наприклад, для робочих решіток з оптимальними або меншим за оптимальне значення відносних шагів (зі збільшеною кількістю робочих лопаток), питома вага негативного впливу на ефективність ступеня, описаних вище непрямих факторів підрізки вихідних кромок робочих лопаток, істотно знижується. Цей факт пояснюється досить просто: такі решітки характеризуються значно меншим рівнем втрат від удару і

зниженим градієнтом залежності цих втрат від величини кута удару.

У подібних решітках вплив геометричного кута входу і, відповідно, кута удару на втрати в решітці носить досить плавний, низькоградієнтний характер [9] і не так сильно позначається на загальному результаті. Тут на перший план виходять безпосередньо втрати, пов'язані з перетіканням в зазорах, утворених підрізками вихідних кромок.

Очевидно, що в гранично можливішому випадку, в якому висота підрізки вихідних кромок матиме гарантоване мінімально необхідне значення, рівень безпосереднього негативного впливу підрізки може бути зведений до мінімуму. При цьому зазначені варіанти першої і другої груп оптимальних ПЧ, можуть виявитися практично рівноцінними з точки зору їх ефективності.

Дійсно, з одного боку застосування в робочих решітках профілів зі збільшеним радіусом кола «животика» (група 1) вносить зміну форми каналів решітки і, як наслідок, призведе до деякого збільшення профільних втрат. З іншого боку, використання в робочих решітках оригінальних (атласних) профілів пов'язане з необхідністю застосування лопаток з підрізками вихідних кромок (група 2), а значить, навіть при гарантованому забезпеченні мінімально необхідної для складання робочих коліс висоти підрізки будуть присутні відповідні втрати, пов'язані з цим.

Цілком ймовірно, що при незначному збільшенні радіусу кола «животика» (наприклад, не більше ніж на 10 %), а також при забезпеченні мінімально необхідної висоти підрізки вихідних кромок, відповідні рівні додаткових втрат в решітках, обумовлені зазначеними фактами, можуть мати досить близькі значення. Для перевірки і підтвердження вищезазначеного спеціально були проведені розрахунки ефективності двох робочих решіток.

Для перевірки і підтвердження вищесказаного спеціально були проведені розрахунки ефективності двох робочих решіток. Перша решітка складена з профілів 1ММК-У оригінальної форми, а друга з модифікованих профілів 1ММК-У, у яких радіус кола «животика» збільшено порівняно з оригінальним профілем на 9,82 %. Відносні кроки решіток були однаковими і рівними 0,8. При розрахунках моделювалося безударне натікання на решітку. Розрахунки підтвердили негативний вплив збільшення радіусу кола «животика» на характер обтікання і на економічність решіток, які використовують такі профілі. У решіток з профілями зі збільшеним на 9,83 % радіусом кола «животика» коефіцієнт профільних втрат решітки збільшився на 0,07 % (абсолютних) у порівнянні з вихідною решіткою з оригінальних профілів 1ММК-У. Таким чином, результати попередніх порівняльних розрахунків з оцінки впливу збільшення радіусу «животика» на ефективність тур-

бінних решіток дозволяють говорити про близькі рівні економічності зазначених варіантів ПЧ ЦВТ (з підрізкою вихідних кромок робочих лопаток і без підрізування). Порівняльний аналіз двох технологічних підходів виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток показує, що в залежності від конкретних умов і, пов'язаних з ними різного роду конструкційних, технологічних і техніко-економічних обмежень, оптимальні рішення для ПЧ були знайдені як для конструкцій, що використовують підрізку вихідних кромок, так і для конструкцій з робочими лопатками без підрізки вихідних кромок. При цьому слід зазначити, що остаточне рішення щодо вибору того чи іншого варіанту слід приймати з урахуванням аналізу міцності робочих лопаток (виникнення концентрації напружень в місцях підрізки вихідних кромок, ймовірності виникнення втомних тріщин при тривалій експлуатації турбін і т.п.).

Висновки

1 Виконана багатопараметрична оптимізація конструктивних і термогазодинамічних параметрів ПЧ ЦВТ К-330-23,5 показала, що без застосування сучасних методів оптимального проектування виявити приховані резерви підвищення ефективності сучасних осевих турбін неможливо.

2 Знайдені 12 оптимальних рішень для ПЧ ЦВТ К-330-23,5 дозволяють оцінити вплив на ефективність ЦВТ, як чисел робочих лопаток, так і порівняти два технологічних підходи виготовлення робочих лопаток – з підрізуванням вихідних кромок і без такої.

3 В залежності від потреб виробника можна використовувати обидві технології виготовлення цільнофрезерованих лопаток з забезпеченням високих рівнів ККД ПЧ турбіни.

4 Для підвищення точності порівняння, зазначених технологічних підходів виготовлення цільнофрезерованих лопаток надалі необхідно більш детально вивчити вплив збільшення радіусу кола «животика» модифікованих профілів на ефективність робочих решіток за аналогією методики оцінки впливу підрізування вихідних кромок на ефективність робочої решітки та ступені в цілому [9].

Список літератури

1. Cao, L., Si, H., Lin, A., Li, P., Li, Y. Multi-factor optimization study on aerodynamic performance of low-pressure exhaust passage in steam turbines. *Applied Thermal Engineering*. 2017. no.124. pp. 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.136>.
2. Turner, Mark G., Park, K. [at alias] Framework for multidisciplinary optimization of turbomachinery. *Proceedings of ASME Turbo Expo*. 2010. GT2010-22228. <https://doi.org/10.1115/GT2010-22228>.
3. Safari, A., Lemu, H. G., Assadi, M. A novel combination of adaptive tools for turbomachinery airfoil shape optimization using a real-coded genetic algorithm. *Proceedings of ASME*

- Turbo Expo.* 2013. GT2013-94093. <https://doi.org/10.1115/GT2013-94093>.
- Ogaday, W., Moore, W., Mala-Jetmarova, H., Gebreslassie, M., Tabora, G.R., Belmont, M.R., Savic, D. A. Comparison of multiple surrogates for 3D CFD model in tidal farm optimization. *Procedia Engineering*. 2016. No. 154. P. 1132–1139. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.523>.
 - Mehmani, A. *Uncertainty-integrated surrogate modeling for complex system optimization : Ph.D. thesis*. Syracuse University, 2015.
 - Yang, X., Liu, B.O., Cao, Z. Opposition-based artificial bee colony algorithm application in optimization of axial compressor blade. *Proceedings of ASME Turbo Expo*. 2013. GT2013-95177.
 - Usatyi, O., Avdieieva, O., Maksuta, D., Tuan, P. Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines. *AIP Conference Proceedings*. 2018. vol. 2047. no. 1, pp. 020025. doi: 10.1063/1.5081658.
 - Усатий А. П. *Всережисна мнопараметрическая многокритериальная оптимизация проточной части турбин в интегрированном информационном пространстве* : дис. ... д-р техн. наук: 05.05.16 / Усатий Александр Павлович. Харків, 2012. 418 с. Библиогр.: С. 359–376.
 - Boiko A., Govorushchenko Yu., Usaty A. *Optimization of the Axial Turbines Flow Paths*. New York: Science Publishing Group, NY 10018, U.S.A., 2016.
 - Бойко А. В., Усатий А. П., Авдеева Е. П. Методология объектно-ориентированной комплексной оптимизации проточных частей мощных паровых турбин с учетом переменного режима работы. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2014. № 13(1056). С. 5–10. Библиогр.: 10 назв. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).
 - Бойко А. В., Говорущенко Ю. Н., Усатий А. П. Интегрированное информационное пространство САПР «Турбоагрегат» – методологическое обеспечение и программная реализация. *Электронное моделирование*. Киев: Академперіодика, 2009. № 2. С. 43–55.
 - Бойко А. В., Усатий А. П., Авдеева Е. П. Создание методики оценки влияния подрезки выходных кромок на эффективность турбинных решеток активного типа. *Проблеми машинобудування*. Харків: ППМаш ім. А.М. Підгорного. 2010. Т. 13. № 6. С. 9–16.
 - Turner, Mark G., Park, K. [at alias] (2010), “Framework for multidisciplinary optimization of turbomachinery”, *Proceedings of ASME Turbo Expo*, GT2010-22228, <https://doi.org/10.1115/GT2010-22228>.
 - Safari, A., Lemu, H. G., Assadi, M. (2013), “A novel combination of adaptive tools for turbomachinery airfoil shape optimization using a real-coded genetic algorithm”, *Proceedings of ASME Turbo Expo*, GT2013-94093, <https://doi.org/10.1115/GT2013-94093>.
 - Ogaday, W., Moore, W., Mala-Jetmarova, H., Gebreslassie, M., Tabora, G.R., Belmont, M.R., Savic, D. A. (2016), “Comparison of multiple surrogates for 3D CFD model in tidal farm optimization”, *Procedia Engineering*, no. 154, pp. 1132–1139, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.523>.
 - Mehmani, A. (2015), *Uncertainty-integrated surrogate modeling for complex system optimization*, Ph.D. thesis, Syracuse University.
 - Yang, X., Liu, B.O., Cao, Z. (2013), “Opposition-based artificial bee colony algorithm application in optimization of axial compressor blade”, *Proceedings of ASME Turbo Expo*, GT2013-95177.
 - Usatyi, O., Avdieieva, O., Maksuta, D., Tuan, P. (2018), “Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 2047, no. 1, pp. 020025. doi: 10.1063/1.5081658.
 - Usatyi O. P. (2012), *All-mode multi-parameter multicriteria optimization of the turbine flow path in the integrated information space* : dis. ... Dr. Tech. Sciences: 05.05.16 / Usatyi Oleksandr Pavlovich, Kharkov, 418 p.
 - Boiko A., Govorushchenko Yu., Usaty A. (2016), *Optimization of the Axial Turbines Flow Paths*, Science Publishing Group, New York, NY 10018, U.S.A.
 - Boiko A. V., Usaty A. P., Avdieieva O. P. (2014), “Methodology of the Object-Oriented Complex Optimization of the Flow Passes of Powerful Steam Turbines Taking into Consideration the Variable Operation Mode”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 13(1056), pp. 5–10, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).
 - Boiko A. V., Govorushchenko Yu. N., Usatyi O. P. (2009), “Integrated information space CAD “Turboagregat” – methodological support and software implementation”, *Electronic modeling*, no. 2, pp. 43–55.
 - Boiko A. V., Usatyi O. P., Avdieieva O. P. (2010), “Creation of a methodology for assessing the effect of trimming trailing edges on the efficiency of active-type turbine grids”, *Problems of mechanical engineering*, vol. 13, no. 6, pp. 9–16.

References (transliterated)

Надійшла (received) 18.01.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Усатий Олександр Павлович (Усатый Александр Павлович, Usaty Oleksandr) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: alpaus@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8568-5007>.

Авдеева Олена Петрівна (Авдеева Елена Петровна, Avdieieva Olena) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: Olena.Avdieieva@kpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9358-4265>.

Пальков Ігор Андрійович (Пальков Игорь Андреевич, Palkov Ihor) – заступник головного конструктора парових турбін АТ «Турбоатом», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4639-6595; e-mail: igorpalkov@i.ua.

Пальков Сергій Андрійович (Пальков Сергей Андреевич, Palkov Sergii) – начальник сектору конструкторського відділу АТ «Турбоатом», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2215-0689; e-mail: sergpalkov@gmail.com.

Іщенко Олег Ігоревич (Ищенко Олег Игоревич, Ishchenko Oleh) – провідний конструктор конструкторського відділу АТ «Турбоатом», м. Харків, Україна; e-mail: oleg_ishchenko@i.ua.