

УДК 621.438

ЛАПУЗІН О. В.^{1*}, СУБОТОВИЧ В. П.², ЮДІН Ю. О.³

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОПЛОВИХ РЕШІТОК ТУРБОМАШИН

¹ к.т.н., доцент, доцент кафедри турбінобудування, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна.

² д.т.н., старший науковий співробітник, професор кафедри турбінобудування, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна.

³ к.т.н., доцент, професор кафедри турбінобудування, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна.

* e-mail: alexlapuzin14@gmail.com

Вступ. При виконанні одновимірного теплового розрахунку ступеня турбіни з циліндричними межами Г. Ю. Степанов запропонував використовувати наступні оцінювальні характеристики соплової решітки : коефіцієнт витрати, коефіцієнт втрат кінетичної енергії (або еквівалентний йому ККД решітки), коефіцієнт швидкості та кут виходу потоку. Усі ці характеристики визначаються за результатами осереднення різними методами параметрів нерівномірного потоку перед та за решіткою.

Коефіцієнт витрати та оціночний кут потоку дозволяють визначити фактичну витрату газу, якщо відомі горлова площа міжлопаткових каналів, осереднений тиск за решіткою, а також параметри гальмування перед нею. Але, колова проекція осередненої швидкості, яка знаходиться потім по теоретичній швидкості потоку за решіткою, оціночному куту та коефіцієнту втрат кінетичної енергії, виявляється завжди завищеною, що завищує і коефіцієнт корисної дії ступеня турбіни. Окрім цього, використання чотирьох замість двох оціночних характеристик потоку вносить невизначенність в тепловий розрахунок, оскільки параметрам осередненого потоку за решітками відповідають, як правило, витрати, які більше за фактичні; тобто рівняння витрати в перетинах за решітками не виконуються.

Мета роботи. Щоб уникнути перелічених вище недоліків доцільно звернути увагу на монографію Г. Н. Абрамовича, де розглянуті загальні міркування з приводу вибору способів осереднення параметрів потоку. Визначається, що при усередненні цих параметрів відсутня можливість збереження усіх інтегральних характеристик потоку : повної енергії, ентальпії, кінетичної енергії, ентропії, витрати, кількості руху та трьох її проєкцій, моменту кількості руху та трьох його проєкцій, повного імпульсу. Тому при усередненні нерівномірних параметрів потоку потрібно зберігати лише ті інтегральні характеристики потоку, які конче необхідні для вирішення тієї чи іншої задачі. Наприклад, для визначення тяги реактивного

двигуна доцільно зберігати повну енергію, витрату та повний імпульс, що дозволяє знайти осереднені параметри осьового потоку : тиск, тиск гальмування та температуру гальмування. У розглянутому прикладі ентропія усередненого потоку виявляється більшою за ентропію початкового потоку. Це пояснюється тим, що під час перемішування часток газу з різними швидкостями виникають втрати на вдари, зменшується кінетична енергія та збільшується теплова. Тому в тих випадках, коли задачі за змістом потребують оцінки працеспроможності початкового потоку газу Л. І. Седов та Г. Г. Чьорний пропонують проводити осереднення таким чином, щоб зберегти ентропію газу, що є еквівалентним визначенню середневитратного логарифму тиску гальмування. Однак у цьому випадку перебільшеною буде кінетична енергія осередненого потоку. Втрати кінетичної енергії у решітці будуть зменшеними, а похибка у визначенні ККД ступеня стане ще більшою.

Ми вважаємо, що під час розв'язання задачі визначення ККД ступеня необхідно користуватися рівнянням моментів кількості руху.

Тому під час осереднення параметрів потоку необхідно зберігати за решіткою не ентропію, а осьові проекції кількості руху.

Основна частина. Крутний момент, що діє на робочі лопатки, визначається різницею осьових проекцій моментів кількості руху потоку перед і за робочими лопатками тобто різницею $\overline{M}_a - \overline{M}_{a2}$. Дві риси свідчать про осереднення параметрів потоку вздовж радіального та тангенціального напрямів. Ці моменти та колова швидкість обертання валу визначають так звану потужність ступеня на колі робочого колеса $N = \omega(\overline{M}_a - \overline{M}_{a2})$ і відносний лопатковий ККД ступеня. При визначенні потужності елементарного ступеня $\omega(\overline{M}_a - \overline{M}_{a2})$ умова збереження за сопловою решіткою осьової проекції кількості руху $\overline{M}_a = M_a$, є еквівалентною визначенню тут середньовитратної колової складової швидкості $\overline{C}_u$. У міжвінцевому зазорі за сопловою решіткою крокова нерівномірність параметрів потоку знижується, а потік відповідає закону сталості моменту кількості руху вздовж кожної трубки течії. Саме тому $\overline{C}_u = \overline{M}_a / (r\overline{g})$ не залежить від місця розміщення вимірюваних приладів у міжвінцевому зазорі.

На першому етапі потік у ступені розбивається на велику кількість елементарних ступенів (трубок течії), у межах кожної із яких параметри потоку вздовж радіуса вважаються незмінними. Загальні міркування щодо питання вибору способів осереднення параметрів потоку розглянуті у монографії Г. Н. Абрамовича. Відзначено, що стан одновимірного просторового потоку в кожній трубі течії визначається п'ятьма незалежними па-

раметрами течії (наприклад, параметрами гальмування $\bar{P}^*$, $\bar{T}^*$, тиском $\bar{P}$ та кутами $\bar{\alpha}$ і $\bar{\gamma}$). Тому під час осереднення вздовж кроку можна одночасно зберігати незмінними тільки п'ять сумарних фізичних характеристик початкової течії (в осьовому потоці – тільки три характеристики).

Ми пропонуємо метод осереднення, у якому окрім згаданої вище осьової проекції моменту кількості руху M_a зберігається повна енергія E , витрата g , кінетична енергія E_k , а також теоретична кінетична енергія E_{kt} , що однозначно визначає осереднені параметри потоку за сопловою решіткою $\bar{T}^*$, $\bar{P}^*$, $\bar{P}$, $\bar{\alpha}$, $\bar{\gamma}$, та коефіцієнт втрат кінетичної енергії у струмці течії, яка проходить крізь цю решітку, $\bar{\zeta}_c = 1 - E_k/E_{kt} = 1 - (\bar{G}/\bar{G}_t)^2$. Інтегральні характеристики розглянутої струмки течії – це $\bar{\zeta}_c$, $\bar{\alpha}$, $\bar{\gamma}$.

На другому етапі двовимірний вісесиметричний потік у сопловій решітці може бути зведеним до одновимірного (усереднення вздовж радіуса). Для цього підсумовуються всі інтегральні характеристики розрахованих струмок течії, потім визначаються за їх допомогою осереднені параметри всього потоку $\bar{T}^*$, $\bar{P}^*$, $\bar{P}$, $\bar{\alpha}$, $\bar{\gamma}$, а також коефіцієнт втрат кінетичної енергії сопла $\bar{\zeta}_c$. Цей коефіцієнт нічим не відрізняється від своєї оціночної величини, згаданої на початку доповіді. У той же час оціночні величини кутів потоку суттєво відрізняються від кутів $\bar{\alpha}$ та $\bar{\gamma}$, а аеродинамічну досконалість соплової решітки визначає не коефіцієнт $\bar{\zeta}_c$, а комплексний критерій якості $\sqrt{1 - \bar{\zeta}_c} \cos \bar{\gamma}$, що має фізичний сенс коефіцієнта колової компоненти швидкості.

Висновки. 1. Проаналізовані недоліки комплексу оціночних характеристик плоского потоку в сопловій решітці.

2. З метою усунення похибок і суперечностей в одновимірному тепловому розрахунку турбінного ступеня запропонований новий метод осереднення параметрів просторового потоку за сопловою решіткою і визначення її аеродинамічних характеристик.