

### ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков С.П. Теория солитонов: метод обратной задачи. - М.: Наука, 1980. - 230 с.
2. Підгорний О.Л., Куценко Л.М. Опис подери, ортотоміки і катакаустики як елементів відбивальної системи // Труды / Таврическая государственная агротехническая академия.- вып. 4, том 10.- Мелитополь: ТГАТА, 1999 - с.14-18
3. Тормосов Ю.М. Лебединец И.В. Принципы построения жарочных шкафов с учетом эффекта «теплового резонанса» // Проблемы пожарной безопасности. Харьков: Фолио, 2002. Вып. 12. - С. 170-174.

Получено 10.03.2006 г.

УДК 515.2

В.Д. Борисенко, І.В. Устенко, С.А. Устенко

### РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЛОПАТКОВИХ АПАРАТІВ ОСЬОВИХ ТУРБІН

**Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями.** Важливим і одним з найбільш трудомістких етапів у проектуванні турбінних ступенів є профілювання їх лопаткових апаратів. Для задоволення всіх різноманітних, часто суперечливих вимог, проектувальникам доводиться розглядати велику кількість варіантів профілів, тобто займатися випадковим пошуком оптимального варіанта.

Незважаючи на значний досвід розробки та створення досконалих турбін, бурхливий, особливо останніми роками, розвиток відповідних комп'ютерних методів проектування та конструювання, все ж таки можна констатувати, що технологія проектування турбін ще не стала технологією в звичайному розумінні, тобто не стала набором універсальних правил. Вона залишається заручницею мало передбачуваного шляху інженерного пошуку найкращого технічного рішення. Все це в повному обсязі відноситься і до лопаткових апаратів турбін, які є найважливішими компонентами цих широко поширених у транспортній та стаціонарній енергетиці теплових двигунів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останніми роками опубліковано кілька монографій, наприклад [1-3], присвячених

розв'язанню актуальних питань газодинамічних розрахунків та автоматизованого проектування осьових турбін різного цільового призначення. Загальні підходи до розробки автоматизованих систем проектування викладені в роботі [4]. Створення проточних частин осьових турбін, що формуються кількома ступенями рухомих і нерухомих вінців, є складним проектно-конструкторським завданням, вирішення якого розбивається на кілька етапів, пов'язаних з геометричним моделюванням решіток профілів, форма яких істотно залежить від способу закрутки лопаток по висоті проточної частини, газодинамічними розрахунками з використанням одно-, двох- і тривимірних моделей течії робочої речовини, а також розрахунків на міцність.

© В.Д. Борисенко, І.В. Устенко, С.А. Устенко, 2006

Часто геометричне моделювання і газодинамічні розрахунки здійснюються паралельно, що істотно скорочує час на вирішення задачі.

**Формулювання цілей статті.** Метою цієї статті є подальший розвиток методів геометричного моделювання лопаткових апаратів турбін і розрахунків течії робочої речовини в решітках профілів, що їх формують, та поєднання геометричних і газодинамічних розрахунків в єдиний обчислювальний процес. Розроблене програмне забезпечення придатне для подальшого його включення до відповідних модулів системи автоматизованого проектування лопаткових апаратів осьових турбін.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Проектування лопаткових апаратів газотурбінних двигунів є складною багатоплановою задачею. Для її розв'язання необхідне використання математичних, газодинамічних, міцнісних та геометричних моделей різного рівня. При практичній реалізації розв'язання подібної задачі розбивається на кілька етапів. Принциповою особливістю при цьому є те, що на кожному етапі передбачається оптимізація одержуваних результатів, що може здійснюватися як простим перебором варіантів, так і на основі застосування спеціальних математичних методів пошуку екстремуму.

На першому етапі проектування решіток профілів турбін осьового типу передбачає безпосереднє геометричне моделювання решітки профілів на параметри, які визначаються за результатами розрахунку

одновимірної течії робочої речовини. У першу чергу це відноситься до кутів входу і виходу потоку. Цьому питанню в літературі приділено достатньо уваги [5–9]. Автори робіт застосовують різноманітні криві (еліпси, овали Ламе, модифіковані лемніскати Бернуллі, гіперболічні спіралі, степеневі параметричні функції Бартіні та інші) для подання обводів спинки і коритця профілю. Оскільки це питання висвітлене в літературі в достатній мірі, то в цій статті воно спеціально не розглядається.

На другому етапі проектування лопаткових апаратів осьових турбін виконується розрахунок двовимірної течії, що дозволяє побудувати епюри розподілу швидкостей по спинці і коритцю профілю та знайти кути виходу потоку із решітки, а це є підставою для уточнення значень висот лопаток на виході із соплових і робочих вінців.

Розглянемо потенційну течію нестисливої робочої речовини в плоскій решітці профілів. Розрахунок такої течії дозволяє отримувати розподіл швидкостей по контуру профілю та кути виходу потоку із решіток профілів довільної товщини. При цьому вважаються відомими форма профілю, кут його установки, крок решітки та кут входу потоку, тобто є наявними вихідні дані характерні для прямої задачі гідродинамічної теорії решіток аеродинамічних профілів. Маючи епюру швидкостей потенційного обтікання можна розрахувати пограничний шар, визначити втрати енергії в решітці, знайти термогазодинамічні параметри.

Розрахунки плоскої решітки не дозволяють врахувати деякі особливості дійсної течії в лопатковому апараті, але вони дають можливість відпрацювати лопаткові профілі в порівняльній постановці задачі.

Розподіл швидкостей течії по контуру профілю можна знайти, розв'язавши інтегральне рівняння, записане відносно комплексної швидкості  $w(z) = u - iv$ .

Згідно з [10] комплексна швидкість у площині течії подається інтегралом Коші, яке для решітки профілів має вигляд:

$$w(z) = 2w_0 e^{-\beta_0} + \frac{1}{it} \oint_C w(\zeta) K(z - \zeta, t) d\zeta. \quad (1)$$

Тут точка  $z = x + iy$  – координата контуру  $C$ , в якій розраховується швидкість;  $\zeta = \xi + i\eta$  – комплексна змінна по контуру профілю;  $t$  – крок решітки;  $K(z - \zeta, t)$  – ядро інтегрального рівняння, яке визнача-

ється залежністю:

$$K(z - \zeta, t) = \operatorname{cth} \left[ \frac{\pi}{t} (z - \zeta) \right].$$

Середня швидкість у нескінченності розраховується наступним чином:

$$w_{\infty} = w_0 e^{-i\beta_0} - (w_1 e^{-i\beta_1} + w_2 e^{-i\beta_2}) / 2,$$

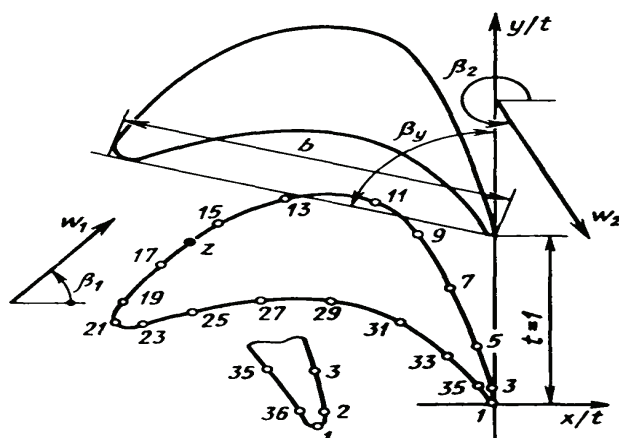
де  $w_1, w_2$  – модулі швидкості потоку в нескінченності перед решіткою та за нею;  $\beta_1, \beta_2$  – кути течії на вході і виході із решітки, відповідно.

Розташування профілів у решітці при розрахунку потенційної течії показано на рис. 1.

Координати профілів задаються у відносному вигляді шляхом ділення їх реальних значень на величину кроку решітки. Відлік кутів течії від осі  $x/t$  виконують у напрямку протилежному обертанню годинникової стрілки. Згідно з умовою непротікання контуру профілю можна записати:

$$w(z) = W(z) e^{-i\beta(z)},$$

де  $W(z)$  – алгебраїчна швидкість, яка має знак плюс або мінус в залежності від того, збігається напрямок вектора швидкості з позитивним обходом контуру (проти годинникової стрілки) чи ні;  $\beta(z)$  – кут, орієнтований в позитивному напрямку між віссю  $x/t$  і дотичною до контуру профілю в довільній точці  $z$ .



Скористаємося параметричним завданням контуру профілю у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}\zeta(\theta) &= \xi(\theta) + i\eta(\theta), & \theta \in [0, 2\pi]; \\ z(\varepsilon) &= x(\varepsilon) + iy(\varepsilon), & \varepsilon \in [0, 2\pi].\end{aligned}\quad (2)$$

Елемент дуги контуру профілю подається виразом:

$$d\zeta(\theta) = e^{i\beta(\theta)}\Omega(\theta)d\theta, \quad (3)$$

де  $\Omega(\theta) = \sqrt{\xi'^2(\theta) + \eta'^2(\theta)}$ ;  $\xi'(\theta) = d\xi(\theta)/d\theta$ ;  $\eta'(\theta) = d\eta(\theta)/d\theta$ .

Рівняння (1) з урахуванням (2) і (3) після перетворень набуде вигляду:

$$W(\varepsilon)e^{i\beta(\varepsilon)} = \frac{1}{it} \int_0^{2\pi} W(\theta)\Omega(\theta)K(z(\varepsilon) - \zeta(\theta), t)d\theta + 2w_0e^{-i\beta_0}. \quad (4)$$

Помноживши обидві частини рівняння (4) на  $e^{i\beta(\varepsilon)} = [x'(\varepsilon) + iy'(\varepsilon)]/\Omega(\varepsilon)$  і відокремивши дійсну частину в інтегральному рівнянні від мнімої, після алгебраїчних перетворень одержимо:

$$W(\varepsilon)\Omega(\varepsilon) = \int_0^{2\pi} W(\theta)\Omega(\theta)K(\varepsilon, \theta)d\theta + F(\varepsilon), \quad (5)$$

де

$$F(\varepsilon) = 2u_1x'(\varepsilon) + (v_1 + v_2)y'(\varepsilon). \quad (6)$$

У виразі (6) під  $u_1$ ,  $v_1$  і  $v_2$  розуміють

$$\begin{aligned}u_2 &= u_1 = w_1 \cos \beta_1; \\ v_1 &= w_1 \sin \beta_1; \quad v_2 = w_2 \sin \beta_2.\end{aligned}$$

Ядро рівняння можна подати наступним чином

$$K(\varepsilon, \theta) = -[a_1x'(\varepsilon) + a_2y'(\varepsilon)],$$

де

$$a_1 = \frac{\sin(2\pi\psi)}{\operatorname{ch}(2\pi\varphi) - \cos(2\pi\psi)}; \quad a_2 = \frac{\operatorname{sh}(2\pi\varphi)}{\operatorname{ch}(2\pi\varphi) - \cos(2\pi\psi)}.$$

У цих виразах під  $\varphi$  і  $\psi$  розуміють

$$\varphi = [x(\varepsilon) - \xi(\theta)]/t; \quad \psi = [y(\varepsilon) - \eta(\theta)]/t.$$

Ядро інтегрального рівняння має особливість, яка усувається в точці  $\varepsilon = \theta$ :

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \theta} K(\varepsilon, \theta) = \frac{1}{2\pi r} = \frac{1}{2\pi} \frac{\xi'\eta'' - \eta'\xi''}{\xi'^2 + \eta'^2},$$

де  $r$  – радіус кривини кривої в точці  $\square$ .

Для однозначного розв'язання рівняння (5) необхідно визначити величину циркуляції швидкості

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} W(\theta)\Omega(\theta)d\theta.$$

При числовому розв'язанні задачі контур профілю розбивають на  $N$  ділянок і заміняють інтеграл у виразі (5) кінцевою сумою за формулою методу числового інтегрування, наприклад методу прямокутників. У результаті отримують систему з  $N$  лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$W(\varepsilon_k)\Omega(\varepsilon_k) = \sum_{l=1}^N W(\theta_l)\Omega(\theta_l)K(\varepsilon_k, \theta_l)\Delta\theta + F(\varepsilon_k), \quad l=1,2,\dots,N.$$

Таким чином, інтегральне рівняння (5) приведено до системи  $N$  алгебраїчних рівнянь вигляду  $Ax = y$ , для розв'язання якої можна застосувати, наприклад метод Краута.

За розглянутим підходом розроблено програму розрахунків розподілу швидкостей по обводах профілів лопаток осьових турбін. Деякі результати розрахунків за цією програмою наведено на рис. 2–4. Слід зразу ж відзначити, що епюри швидкостей мають чисто ілюстративний характер. По осі абсцис на графіках відкладено відносну довжину обводу профілю, починаючи з його спинки, по осі ординат – відносну швидкість течії робочої речовини.

Ліворуч від графіків розподілу швидкостей показано по три профілі, побудовані із застосуванням методу, викладеному в роботі [8], практично за тими ж самими значеннями вихідних даних, що визначають форму профілів.

Дані, показані на рис. 2, відображають вплив кута установки профілів у решітці. Верхній і нижній профілі побудовані з варіюванням цього кута

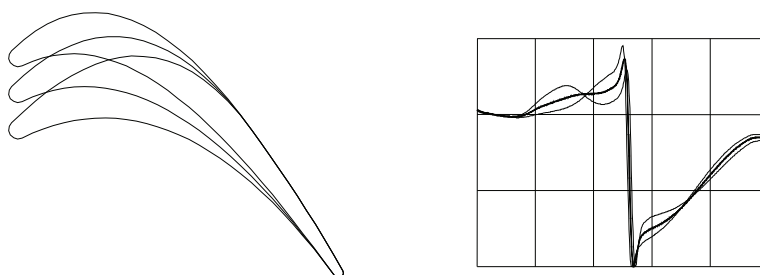


Рисунок 2

відносно його значення, що відповідає середньому профілю. Епюру швидкостей для цього профілю показано товстою лінією. Як впливає з цих графічних даних, епюри швидкостей для цих трьох профілів відрізняються. Найгірший їх характер відповідає профілю з меншим кутом установки, бо для цього профілю, за умови забезпечення заданого кута входу потоку, спинка має обвід з більшою зміною кривини. Різка зміна цієї диференціальної характеристики кривої призводить до відповідної зміни епюр швидкостей. Коливання швидкостей по обводу профілю сприяє відриву потоку і провокує збільшення втрат енергії робочої речовини.

Графічні результати, наведені на рис. 3 і 4, побудовані за тим же принципом що й на рис. 2. Вони відображають вплив осьової протяжності решітки (рис. 3) та горла міжлопаткового каналу (рис. 4).

**Висновки та перспективи розвитку.** В роботі розглянуто підходи до розрахунку течії робочої речовини в решітках осьових турбін, профілі яких моделюються на раніше запропонованих їх геометричних моделях. Подальший розвиток цієї роботи пов'язаний з удосконаленням методу розрахунку потенційної течії робочої речовини шляхом врахування її стисливості та доповнення його розрахунком пограничного шару на профілі з метою визначення втрат енергії в решітці.

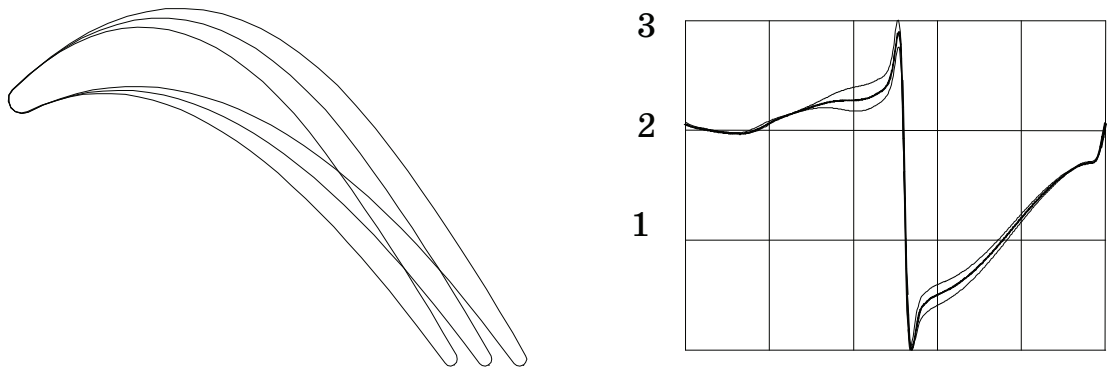


Рис. 3

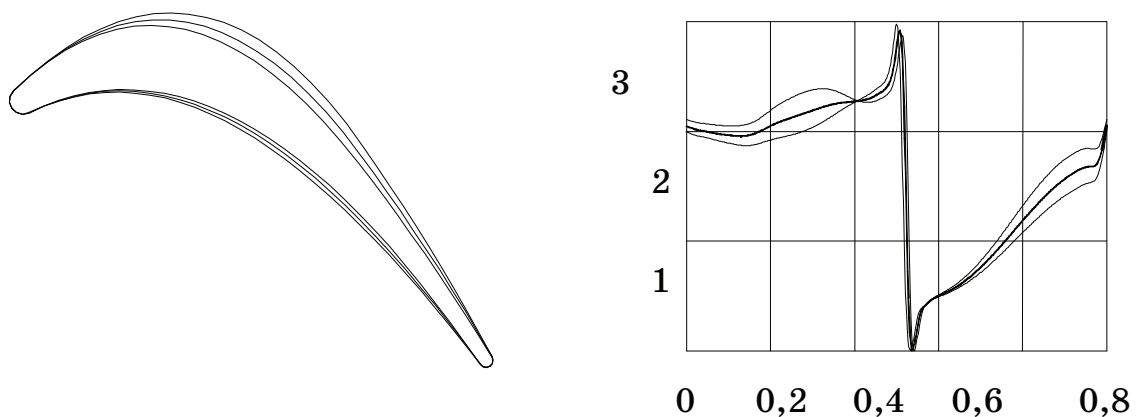


Рис. 4

### ЛІТЕРАТУРА

1. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, С.В. Ершов и др. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – 356 с.
2. Романов В.И., Кирзнер Ф.И. Реверсивные газовые турбины. – СПб.: Судостроение, 1992. – 152 с.
3. Стоянов Ф.А. Оптимальное автоматизированное проектирование проточных частей осевых турбин. – К.: Наукова думка, 1989. – 176 с.
4. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 360 с.
5. Аронов Б.М., Жуковский М.И., Журавлев В.А. Профилирование лопаток авиационных газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1975. – 192 с.
6. Борисенко В.Д., Куклина О.Ю., Устенко С.А. Геометрическое моделирование профилей лопаток турбин // Збірник наукових праць №



3 (369). – Николаїв: УДМТУ. – 2000. – С. 103–111.

7. Борисенко В.Д., Устенко С.А. Геометричне моделювання лопаток осьових турбін // Збірник наукових праць № 1 (373). – Николаїв: УДМТУ. – 2001. - С. 70–82.

8. Борисенко В.Д., Устенко С.А. Профілювання лопаток осьових турбін // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА, 2001. – С. 63–66.

9. Левенберг В.Д., Борисенко В.Д., Гильмутдинов Л.А. Аналитическое профилирование турбинных решеток для системы автоматизированного проектирования. – Николаев: НКИ, 1980. – 52 с.

10. Самойлович Г.С. Гидроаэромеханика. – М.: Машиностроение, 1980. – 280 с.

Получено 19.03.2006 г.

УДК 515.2:621.83

И.А.Бочарова

## ИНТЕРАКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЕЙ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

**Постановка проблемы.** Зубчатые передачи всегда были неотъемлемой частью различной продукции машиностроительного комплекса. Поэтому задачи, связанные с усовершенствованием, ускорением процесса создания новых передач являются актуальными.

**Анализ основных исследований и публикаций.** В работе [1] рассмотрено современное состояние теории зацеплений и предложен новый метод образования профилей зубьев. В работе [2] разработан автоматизированный способ формирования сопряженных криволинейных поверхностей и его применение к оценке состояния режущей кромки инструмента. В работе [3] рассмотрен вопрос автоматизации процесса формирования геометрических моделей винтовых криволинейных поверхностей.

© И.А.Бочарова, 2006

Анализируя состояние и направление работ, по исследованию цилиндрических зубчатых передач, можно сделать вывод о возрастающей в последние годы интенсивности работ в этом направлении, о