

## ПІДВІДНИЙ ПРИСТРІЙ ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРА ЯК ОБ'ЄКТ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті реалізовано системний підхід до геометричного моделювання всіх елементів пристрою підведення робочої речовини. Розглянуто конструктивні особливості деяких елементів вхідного напрямного апарату, наведено математичні моделі геометричного моделювання різних типів меридіональних перетинів вхідних пристроїв. Наведено методику формування тілесного профілю лопатки вхідного напрямного апарату шляхом моделювання її середньої лінії, профілювання симетричного профілю та вигину його вздовж спроектованої середньої лінії. Отримано деякі математичні вирази для розрахунку геометричних параметрів решіток профілів та у виді блок-схеми подано ітераційний алгоритм процесу проектування компресорних решіток профілів лопаток вхідного напрямного апарату. Подано способи геометричного моделювання стійок вхідних систем.

**Ключові слова:** системний підхід, геометричне моделювання, пристрій підведення робочої речовини, меридіональні обводи, лопатковий апарат, середня лінія, спеціальний аеродинамічний профіль, решітки профілів, математичні криві, стійки.

Підвідний пристрій відцентрового компресора призначений для забезпечення рівномірного підводу потоку робочої речовини (повітря) до робочого колеса та забезпечення заданого поля швидкостей. Поліпшення організації течії повітря вимагає удосконалення методів геометричного моделювання елементів проточної частини пристрою підведення робочої речовини, який повинен забезпечувати безперервне та безударне підведення повітря до робочого колеса. Підвідний пристрій уявляє собою підвідний патрубок, в стінки якого вмонтовані лопатки вхідного напрямного апарату, та стійки, що підтримують опори катання ротора. Кожен елемент такої конструкції повинен бути відповідним чином спрофільований, тому задачею геометричного моделювання є розробка сучасних геометричних методів для моделювання кожного елемента із складових пристрою підведення повітря з метою вдосконалення показників роботи компресора в цілому.

Сучасний стан обчислювальної техніки дозволяє об'єднати одиничні етапи геометричного моделювання і аеродинамічного розрахунку проточної частини відцентрових компресорів з розрахунками на міцність та підготовки даних для технологічної реалізації її елементів. Багаторічні дослідження у галузі вдосконалення геометрії проточних частин турбомашин дають змогу вдосконалити вже існуючі конструкції машин та розробити нові типи проточних частин для різних напрямів руху робочої речовини. Базуючись на останніх досягненнях прикладної геометрії та

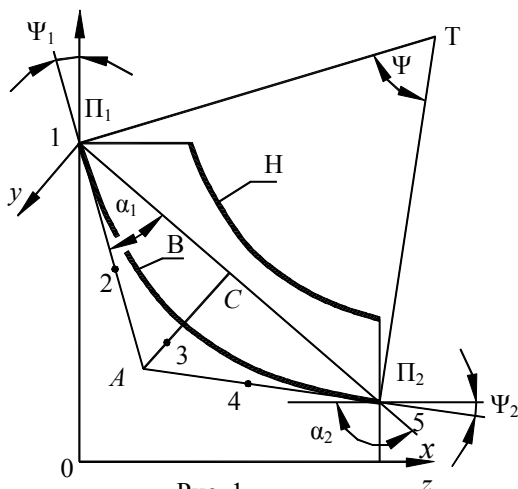


Рис. 1

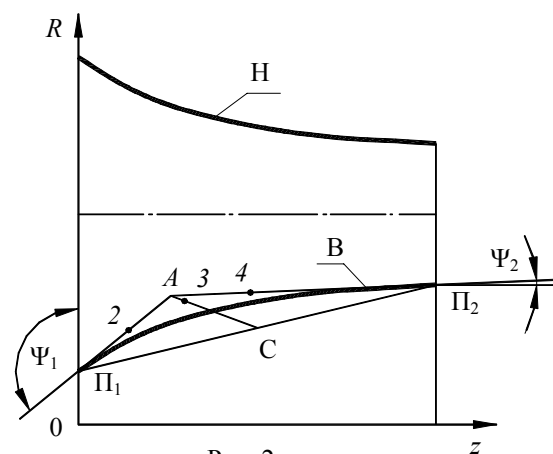


Рис. 2

комп'ютерної графіки наведемо розроблені автором у складі наукового колективу деякі методи геометричного моделювання елементів підвідних пристроїв робочої речовини відцентрових компресорів, які дозволяють у широкому діапазоні варіювання геометричних параметрів генерувати прийнятні їх форми.

Меридіональні перерізи підвідних пристроїв відцентрових компресорів можуть бути з осьовим або радіальним підведенням потоку. Вони

підрозділяються на осесиметричні та колінообразні патрубки, патрубки із криволінійною віссю симетрії, з тангенціальним підведенням та ін. Всі перелічені підвідні патрубки мають меридіональні границі складної аеродинамічної форми та вимагають відповідних методів їх профілювання.

Опишемо меридіональні обводи вхідної системи відцентрового компресора методом Безьє [2]. Крива Безьє визначається вершинами деякої ламаної лінії (рис. 1), яка у першому наближенні апроксимує обвід. Зміною положення вершин ламаної лінії впливають на форму кривої. З метою забезпечення додаткових можливостей локального впливу на форму результуючої кривої пропонується використовувати вагові коефіцієнти вершин ламаної. При цьому крива Безьє описується рівнянням

$B(\bar{P}, t) = \sum_{k=0}^n \omega_k \cdot \bar{P}_k \cdot \Phi_{k,n}(t)$ , для  $0 \leq t \leq 1$ , де  $\omega_k$  – ваговий коефіцієнт  $k$ -ої вершини;  $\bar{P}_k$  – функція компонент векторів вершин ламаної;  $\Phi_{k,n}$  – багаточлен Бернштейна;  $n$  – кількість вершин ламаної;  $t$  – параметр.

Багаточлен Бернштейна  $\Phi_{k,n}$  визначається виразом:  $\Phi_{k,n}(t) = \frac{n!}{k!(n-k)!} t^k (1-t)^{n-k}$ ,  $k \in [0, n]$ .

Після визначення положення вершин ламаної лінії задають значення вагових коефіцієнтів  $\omega$ , які описують функціональну залежність, що визначається із початкових параметрів моделювання та корегується при опрацюванні геометрії проточної частини.

При профілюванні вхідного патрубка осьового типу (рис. 2) у якості квазіортогоналей використовуються прямі, перпендикулярні осі пристрою. Координати внутрішньої й зовнішньої границь патрубка визначаються з однаковими значеннями  $z_i$ . Радіальні координати границь обчислюються за

параметричними виразами:  $x(t) = \sum_{k=0}^n \omega_k x_k \Phi_{k,n}(t)$ ;  $y(t) = \sum_{k=0}^n \omega_k y_k \Phi_{k,n}(t)$ , де  $n$  – степінь апроксимую-

чого полінома,  $x_k, y_k$  – коефіцієнти полінома, який уявляє собою координати вершин характеристичної ламаної лінії Безьє. Результатом розрахунків є масиви радіальних та осьових координат точок меридіонального перетину вхідної системи, які можуть бути використані для візуалізації перетину, виготовлення пристрою, а також для розрахунку параметрів просторового потоку.

Вхідний напрямний апарат уявляє собою кільцевий венець нерухомих лопаток, які розташовані безпосередньо перед входом до робочого колеса. Профілі лопаток утворюються шляхом згину симетричного аеродинамічного профілю відносно середньої лінії, яка забезпечує розрахункові значення кутів входу та виходу потоку, а також стрілку прогину на заданій відстані від вхідної кромки. Таким чином, геометричне моделювання лопаток полягає у рішенні задач профілювання середньої лінії та симетричного аеродинамічного профілю.

Середню лінію лопаток вхідного напрямного апарату пропонується моделювати з використанням параметричної кубічної кривої з двома степенями свободи. Параметрична кубічна крива [3] є така крива, у якої координати  $x$  та  $y$  уявляють собою багаточлени третього степеню відносно деякого параметру  $t$ :

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ y(t) &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \end{aligned} \right\} 0 \leq t \leq 1.$$

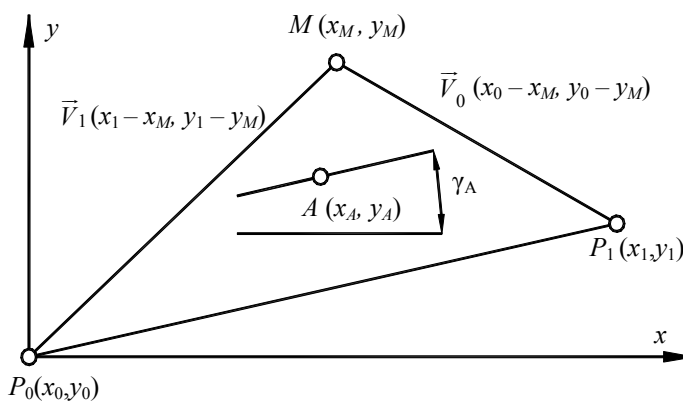


Рис. 3

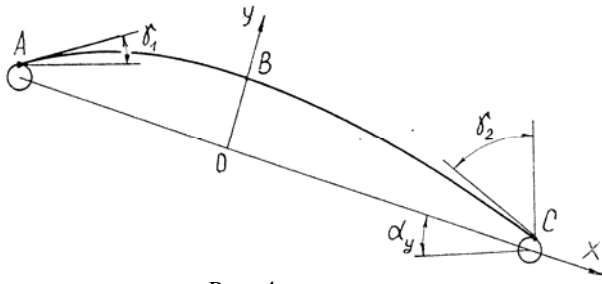


Рис. 4

Існують різні підходи до визначення коефіцієнтів  $a_i, b_i (i = 0,3)$ . Можна їх розглядати як лінійні функції параметру  $t$ . Припустимо, необхідно побудувати криву, яка є дотичною до векторів  $\vec{V}_0, \vec{V}_1$  та проходить через деяку точку  $A$ , в якій задано кут нахилу дотичної  $\gamma_A$  (рис. 3). При цих умовах параметрична кубічна крива повинна мати дві степені свободи. Використання рівнянь кривої та вказаних граничних умов дозволяє отримати

рівняння параметричної кубічної кривої з двома степенями свободи:

$$x(t) = x_0 + \alpha(x_M - x_0)t + [3(x_1 - x_0) - 2\alpha(x_M - x_0) - \beta(x_1 - x_M)]t^2 + [x_M(\alpha - \beta) + x_1(\beta - 2) - x_0(\alpha - 2)]t^3;$$

$$y(t) = y_0 + \alpha(y_M - y_0)t + [3(y_1 - y_0) - 2\alpha(y_M - y_0) - \beta(y_1 - y_M)]t^2 + [y_M(\alpha - \beta) + y_1(\beta - 2) - y_0(\alpha - 2)]t^3;$$

Змінюючи значення параметрів  $\alpha$  й  $\beta$  можливо отримати параметричну кубічну криву, що задовольняє тим чи іншим умовам моделювання середньої лінії лопатки вхідного напрямного апарату відцентрових компресорів.

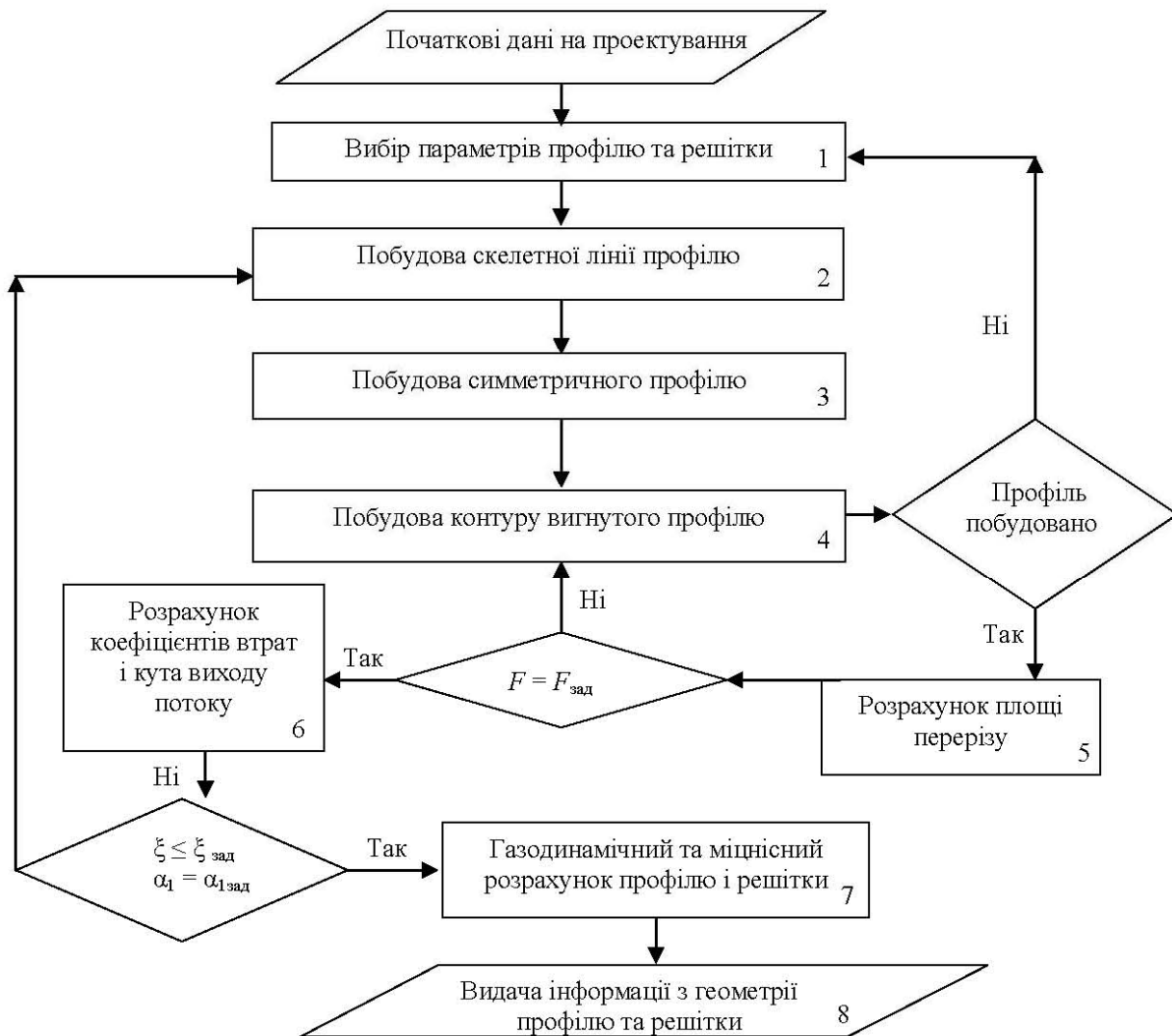


Рис. 5. Укрупнена блок-схема проектування компресорних решіток профілів

Наведемо геометричний метод моделювання обводів профілів лопаток вхідного напрямного апарату із застосуванням конхоїди Нікомеда і заданням закону розподілу товщини профілю уздовж хорди. Симетричний профіль лопатки будується в ортогональній системі координат  $x, y$  (рис. 4), центр якої суміщають з центром симетрії конхоїди. Конхоїда описується рівнянням  $(x^2 + y^2)(y - a)^2 = l^2 y^2$ , де  $a$  та  $l$  – параметри кривої, які потрібно визначити. Підібрати єдину конхоїду, що проходить через три задані точки, складно. Тому для ділянок  $AB$  і  $BC$  моделюють конхоїди зі своїми значеннями параметрів  $a$  і  $l$ . Обидві конхоїди підбирають із умови їх стиковки в точці  $B$ .

Отримання реального тілесного профілю лопатки здійснюється шляхом розподілу симетричного аеродинамічного профілю вздовж середньої лінії. У даному алгоритмі запропоновано відкладати товщини  $\delta$  аеродинамічного профілю, що утворений конхоїдами, вздовж перпендикулярів до середньої лінії для отримання більш точних значень координат точок аеродинамічних обводів профілю. Координати опуклої та вгнутої частини профілю обчислюються за виразами:  $X = X_0 \mp \delta \cdot \sin \gamma$ ;  $Y = Y_0 \pm \delta \cos \gamma$ . Результатом розрахунків стають координати профілю перерізу лопатки вхідного напрямного апарату.

У відповідному пристрої відцентрового компресора лопатки розташовуються таким чином, що утворюють решітку, параметри якої потрібно визначити. Лопатковий апарат повинен забезпечувати заданий кут повороту потоку  $\Delta\alpha$ , який уявляє собою різницю кутів входу  $\alpha_0$  і виходу  $\alpha_1$ . Кут  $\epsilon$  вигину профілю визначається із аналізу експериментальних даних, середній радіус  $R_{cp}$  лопатки знаходиться

за виразом:  $R_{cp} = R_1 \sqrt{\frac{1 + \bar{d}_1^2}{2}}$ . Висота лопатки  $h = R_1 - R_{bm}$ , хорда профілю в середньому перетині –

$b_{cp} = \bar{h}/h$ , де  $\bar{h}$  вибирається в межах 1,5...2,5 і призначається за конструктивними поняттями.

Кількість лопаток апарату  $z = \frac{2\pi \cdot R_{cp} (b/l)_{cp}}{b_{cp}}$  закруглюється до найближчого цілого значення.

Процес проектування компресорних решіток профілів показано на рис. 5 у вигляді блок-схеми [1]. У першому наближенні визначають геометричні параметри профілю і решітки та обчислюють координати скелетної лінії профілю. Алгоритм може бути заснований на використанні різних математичних кривих, вибір яких обумовлений необхідною точністю і характером зміни середньої лінії. Далі будують симетричний аеродинамічний профіль з прямолінійною середньою лінією та вигнутий профіль. Алгоритм визначення координат точок вигнутого профілю заснований на принципі «наядання» симетричного профілю на вигнуту середню лінію лопатки. Обчислення параметру, що визначає міцність лопатки в перетині, дає можливість зробити висновок про якість моделювання; як характерний параметр розглянута площа перетину профілю. Перевірка здійснюється газодинамічним і міцнісним розрахунками. У разі отримання незадовільного результату корегують початкові дані і продовжують процес моделювання. Отримані результати проектування виводяться як інформація з геометрії профілю і решіток.

Одним із елементів відповідного пристрою відцентрового компресора є стійки. Вони виконують роль вузлів, що зв'язують елементи конструкції вхідного патрубку, та впливають на загальну міцність компресора. З аеродинамічної точки зору стійки зменшують вхідний переріз відповідного пристрою та спрямляють потік робочої речовини, що перешкоджає його закручуванню та негативно впливає на

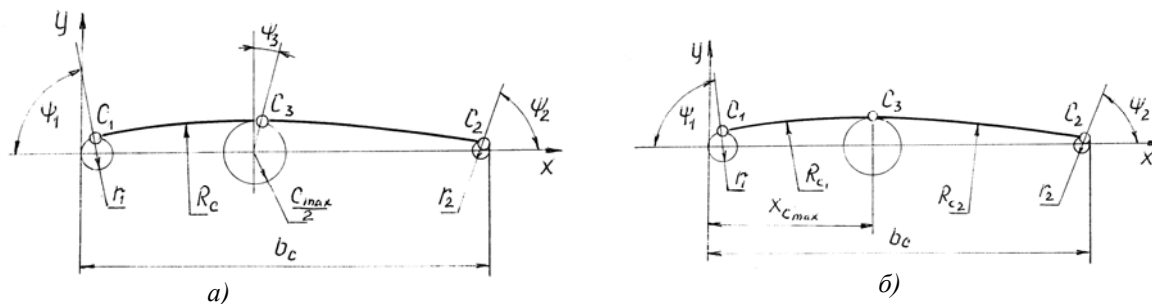


Рис. 6

якість потоку повітря. Тому виникає необхідність у створенні мінімального опору робочій речовині шляхом геометричного моделювання поверхонь стійок. Контури профілю стійки можуть бути описаними кількома способами, які визначаються технологічними можливостями виробника. Найбільш розповсюдженим є спосіб моделювання з використанням одної дуги кола (рис. 6, а) або двох дуг кіл (рис. 6, б), які використовуються при геометричному моделюванні профіля стійки при низьких швидкостях потоку.

Для підвищення аеродинамічних якостей профілю стійок компресорів пропонується моделювання з використанням степеневих поліномів, які мають кривину, що неперервно змінюється (рис. 7).

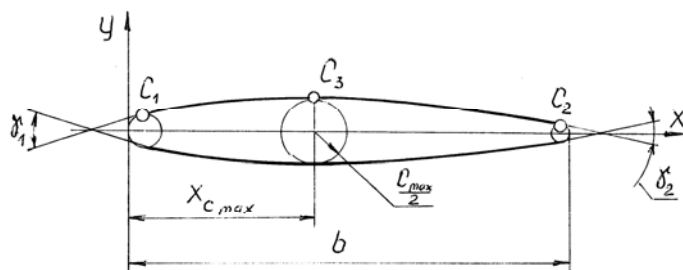


Рис. 7

Виходячи із початкових умов для моделювання відомі шість граничних умов, які вимагають полінома п'ятого степеню

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + a_5 \cdot x^5.$$

Виразивши координати точок  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  та кути нахилу дотичних в цих точках  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  підставимо їх вирази у рівняння полінома та його похідної. Отримаємо систему із шести рівнянь, результатом рішення якої є коефіцієнти полінома для заданих умов

проектування. Отримати сприятливий розподіл кривини вздовж профілю при уточненні кутів  $\gamma_1$  та

$\gamma_2$  можна виходячи із умов  $\int_0^s k^2 ds \rightarrow \min$  та  $\frac{d^2 \rho}{dx^2} \leq 0$ , де  $k = \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}}$ ;  $\rho = \frac{1}{k}$ ;  $s$  – довжина дуги

кривої. Такий підхід може бути використаним при геометричному моделюванні стійок різних конфігурацій.

Таким чином, в роботі реалізовано системний підхід до геометричного моделювання всіх елементів пристрою підведення робочої речовини. Наведені математичні моделі геометричного моделювання різних типів меридіональних перетинів вхідних пристроїв кривою Безье дають можливість локального впливу на форму профілів обводів. Моделювання середньої лінії лопатки вхідного напрямного апарату запропоновано виконувати параметричною кубічною кривою з двома степенями свободи, формування симетричного профілю лопатки – конхойдою Нікомеда, що враховує особливості умов профілювання лопаток. Отримано математичні вирази для розрахунку геометричних параметрів решіток профілів та подано ітераційний алгоритм процесу проектування компресорних решіток профілів лопаток вхідного напрямного апарату. Моделювання профілю стійок одною та двома дугами кіл або степеневими поліномами наведено за заданими умовами проектування.

### Список використаних джерел

1. Бідніченко О. Г. Про алгоритм геометричного моделювання ґраток профілів вхідного напрямного апарату відцентрових компресорів / О. Г. Бідніченко // Прикладна геометрія і інженерна графіка: Республ. Між-відомств. Науково-технічний зб. — К. : КДТУБА, 2003. — С. 189—194.
2. Бідніченко О. Г. Моделювання меридіональних обводів вхідних систем турбомашин / О. Г. Бідніченко, О. Ю. Кукліна // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. — Вип. 4, т. 35. — Мелітополь : ТГАТА, 2007. — С. 94—99.
3. Борисенко В. Д. Параметрические кубические кривые с двумя степенями свободы / В. Д. Борисенко, Е. Г. Бидниченко // Энергетичне машинобудування: Зб. наук. праць № 7 (355) — Миколаїв : УДМТУ, 1998. — С. 92—98.

**Helen BIDNICHENKO**

Mykolaiv

## INLET CENTRIFUGAL COMPRESSOR DEVICE AS OBJECT OF GEOMETRICAL MODELING

*The article implements a comprehensive approach to geometric modeling of all elements of the device for working substance directing. The design features of some elements of the inlet directing device are considered, mathematical models*

*of geometric modeling of different types of meridional sections of inlet devices are presented. The technique for forming the body profile of the inlet guide vane by modeling its medial line, profiling the symmetrical profile and stretching it along the designed medial line is given. Some mathematical expressions for calculating the geometric parameters of the profile lattices are obtained and in the form of a block diagram an iterative algorithm for the process of designing compressor profile lattice of the inlet guide vanes is shown. The methods of geometric modeling of the racks of inlet systems are presented.*

*Keywords: comprehensive approach, geometric modeling, device for supplying working substance, meridional contours, blades device, medial line, special aerodynamic profile, profile lattice, mathematical curves, racks.*

**Елена БИДНИЧЕНКО**

г. Николаев

## **ПОДВОДЯЩЕЕ УСТРОЙСТВО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА КАК ОБЪЕКТ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*В статье реализован системный подход к геометрическому моделированию всех элементов устройства подвода рабочего вещества. Рассмотрены конструктивные особенности некоторых элементов входного направляющего аппарата, приведены математические модели геометрического моделирования различных типов меридиональных сечений входных устройств. Приведена методика формирования телесного профиля лопатки входного направляющего аппарата путем моделирования ее средней линии, профилирования симметричного профиля и изгиба его вдоль спроектированной средней линии. Получены некоторые математические выражения для расчета геометрических параметров решеток профилей и в виде блок-схемы показан итерационный алгоритм процесса проектирования компрессорных решеток профилей лопаток входного направляющего аппарата. Представлены способы геометрического моделирования стоек входных систем.*

*Ключевые слова: системный подход, геометрическое моделирование, устройство подвода рабочего вещества, меридиональные обводы, лопаточный аппарат, средняя линия, специальный аэродинамический профиль, решетки профилей, математические кривые, стойки.*

Стаття надійшла до редколегії 28.03.2017