



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 106009

(13) U

(51) МПК

F04D 29/38 (2006.01)

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2015 10639**

(22) Дата подання заявки: **30.10.2015**

(24) Дата, з якої є чинними  
права на корисну  
модель: **11.04.2016**

(46) Публікація відомостей **11.04.2016, Бюл.№ 7**  
про видачу патенту:

(72) Винахідник(и):

**Герасименко Володимир Петрович (UA),  
Шелковський Михайло Юрійович (UA)**

(73) Власник(и):

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "НАУКОВО-  
ВИРОБНИЧИЙ КОМПЛЕКС  
ГАЗОТУРБОБУДУВАННЯ "ЗОРЯ"-  
"МАШПРОЕКТ",  
пр. Жовтневий, 42-а, м. Миколаїв, 54018  
(UA)**

## (54) ЛОПАТКА НАПРАВЛЯЮЧОГО АПАРАТА ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА

### (57) Реферат:

Лопатка направляющего аппарата осевого компрессора, перо которой утворено периферийною і втулковою торцевими поверхнями, сторонами тиску і розрідження, сполученими зі зв'язаними між собою тороїдальними поверхнями вхідної і вихідної кромок, і містить поперечні перерізи, розташовані уздовж лінії центрів тяжіння профілів лопатки. Середня лінія профілю кожного поперечного перерізу пера лопатки уздовж лінії потоку газу розташована по одну сторону хорди. Тороїдальні поверхні вхідної кромки пера лопатки зв'язані між собою уздовж криволінійної осі, зігнутої в плоскості, перпендикулярній меридіональній плоскості лопатки, а форма цієї осі має подвійний або потрійний вигин - залежно від наявності радіальної нерівномірності набігаючого потоку газу на вході у вінець лопатки. При обертанні ротора компрессора за годинниковою стрілкою (вигляд по ходу газу) форма цієї осі визначається заданим співвідношенням. При цьому форма середньої лінії профілю кожного поперечного перерізу визначається поліноміальною залежністю, що дозволяє знизити втрати повного тиску в направляючому апараті шляхом зменшення розмірів відривних зон на втулці і периферії і приводить до підвищення ККД компрессора на робочому режимі роботи і збільшення запасу газодинамічної стійкості.

UA 106009 U

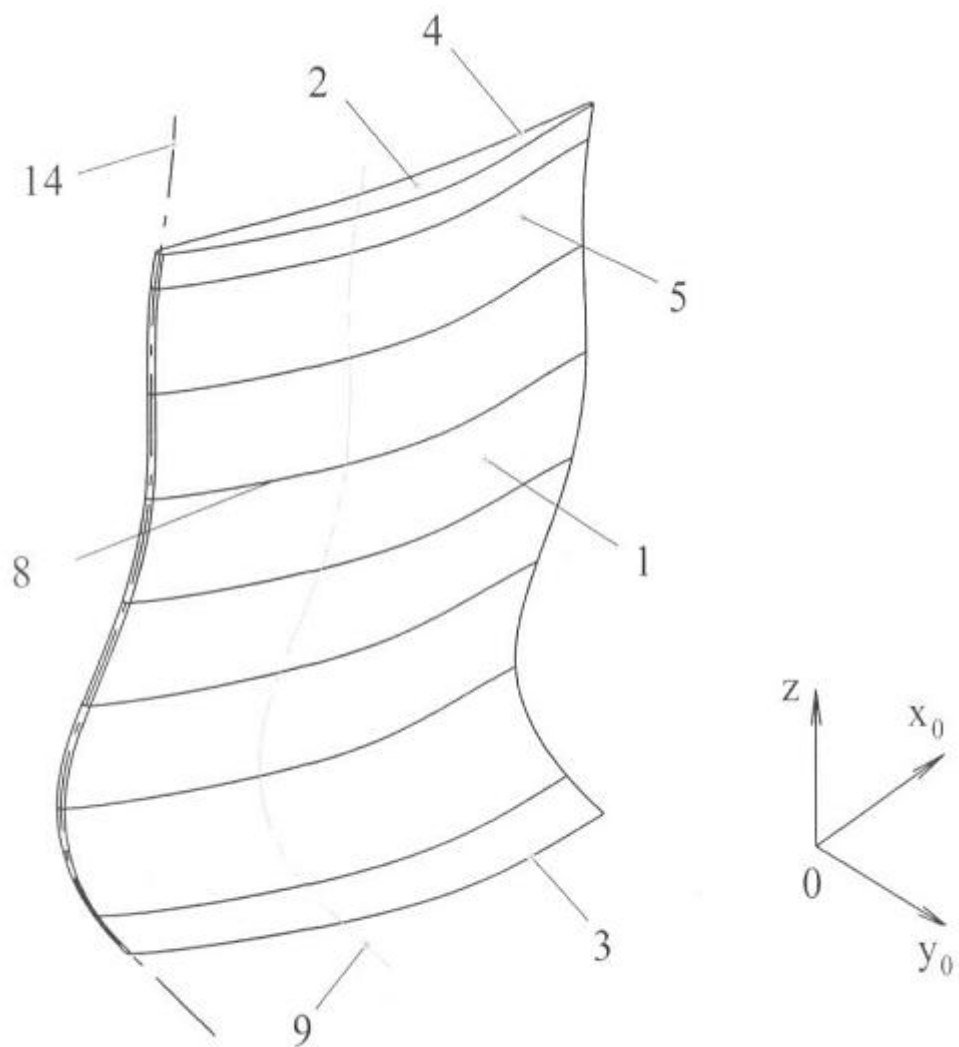


Fig. 1

Корисна модель призначена для використання в області енергетичного машинобудування, а саме в осьових компресорах газотурбінних двигунів.

З існуючого рівня техніки відома лопатка направляючого апарата компресора турбомашини, утворена зв'язаними між собою тороїдальними поверхнями вхідної і вихідної кромок і бічними поверхнями тиску і розрідження, вісь центрів тяжіння перерізів якої має тангенціальну складову з подвійним вигином, при цьому перший вигин переважно направлений проти напрямку обертання внутрішнього обода, а другий вигин - по напрямку обертання [патент RU 2341660C1, 20.12.2008]. Недоліком даного технічного рішення є неоптимальна з точки зору забезпечення безвідривної течії потоку газу форма профілю відомої лопатки, а також застосування стандартної форми середньої лінії при профілюванні поперечних перерізів лопатки, тому застосування такої лопатки статора не приводить до зниження аеродинамічних втрат в ступені осьового компресора.

Відома лопаткова решітка турбомашини, профільні перерізи лопаток якої на меридіональних поверхнях мають зігнуту середню лінію, розташовану по одну сторону відносно хорди і зв'язану з останньою в задній точці профілю під гострим кутом, величина якого на ділянці від задньої кромки до вершини вигнутості спочатку монотонно зростає, а потім плавно убыває [патент UA69501, опубл. 15.09.2004]. Така форма профілю відомої лопатки знижує залишкову градієнтність потоку і призводить до підвищення ККД вінців лопаток. Проте, теорія і експериментальні дослідження показують, що недоліком даного технічного рішення є підвищені вторинні втрати в області торцевих поверхонь за наявності радіальної нерівномірності газового потоку на вході і значних кутах повороту потоку (від 25° до 50°).

Найбільш близьким аналогом корисної моделі є лопатка направляючого апарату осьового компресора [патент RU 2219377, опубл. 10.08.2002], що має сторони тиску і розрідження, які проходять по хорді між передньою і задньою кромками і в подовжньому напрямі між кореневою частиною і вершиною, звужується по хорді до середньої частини, відрізняється наявністю тупого кута сполучення  $B=100-130^\circ$  між стороною розрідження лопатки і задньою кромкою в торцевих стінках, і кутом сполучення, що зменшується, від задньої кромки до передньої кромки до  $B=90^\circ$ , при цьому кут нахилу осі установки відомої лопатки до радіальної осі  $D$  плавно змінюється уздовж подовжнього розмаху лопатки. Недоліками даного технічного рішення є використання профілів поперечного перерізу пера лопатки із стандартною формою середньої лінії і неоптимальний закон зміни кута нахилу  $D$  з радіальною віссю в тангенціальному напрямі по висоті лопатки за наявності радіальної нерівномірності газового потоку на вході у вінець, що не приводить до істотного поліпшення аеродинамічних характеристик направляючого апарата і не дозволяє значно підвищити ККД і запаси стійкої роботи багатоступінчастого осьового компресора.

Задачею, на вирішення якої направлена корисна модель, що заявляється, є підвищення ефективності направляючих апаратів осьових компресорів ГТД шляхом їх аеродинамічного вдосконалення, що приводить до підвищення ККД і збільшення газодинамічної стійкості (запасу по зриву потоку).

Дана задача вирішується за рахунок того, що в лопатці направляючого апарата осьового компресора, перо якої утворене периферійною і втулковою торцевими поверхнями, сторонами тиску і розрідження, сполученими зі зв'язаними між собою тороїдальними поверхнями вхідної і вихідної кромок, і містить поперечні перерізи, розташовані уздовж лінії центрів тяжіння профілів лопатки, а середня лінія профілю кожного поперечного перерізу пера лопатки розташована по одну сторону хорди, згідно з корисною моделлю, що заявляється, тороїдальні поверхні вхідної кромки пера лопатки зв'язані між собою уздовж криволінійної осі, зігнутої в плоскості, перпендикулярній меридіональній плоскості лопатки, а форма цієї осі має подвійний або потрійний вигин - залежно від наявності радіальної нерівномірності набігаючого потоку газу на вході у вінець лопатки, і при обертанні ротора компресора за годинниковою стрілкою (вигляд по ходу газу) форма цієї осі визначається наступним співвідношенням:

$$\begin{aligned} \vartheta_0 = & \left( [18,12 \cdot (h_0)^6 - 61,09 \cdot (h_0)^5 + 76,78 \cdot (h_0)^4 - 42,69 \cdot (h_0)^3 + 8,965 \cdot (h_0)^2 - \right. \\ & \left. - 0,126 \cdot (h_0) + 0,74] \cdot T_1 + [10,65 \cdot (h_0)^6 - 34,35 \cdot (h_0)^5 + 33,05 \cdot (h_0)^4 - \right. \\ & \left. - 2,22 \cdot (h_0)^3 - 11,2 \cdot (h_0)^2 + 4,07 \cdot (h_0) + 0,54] \cdot T_2 \right) \cdot T_3, \end{aligned}$$

де  $T_1$ ,  $T_2$  - константи, що приймаються рівними  $T_1=1$ ,  $T_2=0$  для направляючих апаратів перших ступенів багатоступінчастого осьового компресора, і що приймаються рівними  $T_1=0$ ,  $T_2=1$  для направляючих апаратів середніх і останніх ступенів багатоступінчастого осьового компресора,  $T_3$  - константа, що вибирається в межах  $0,1 \div 1,5$ ;

$\vartheta_{0i}$  - відносна окружна координата точки осі тороїдальних поверхонь вхідної кромки, визначується співвідношенням:

$$\vartheta_{0i} = \vartheta_i / \vartheta_{\text{вих}i},$$

де  $i$  - номер поперечного перерізу по висоті пера лопатки;

5  $\vartheta_i$  - значення окружної координати кривої - осі тороїдальних поверхонь вхідної кромки, відлічуване від вертикальної осі, перпендикулярної до осі двигуна;

$\vartheta_{\text{вих}i}$  - значення окружної координати кривої - осі тороїдальних поверхонь вхідної кромки, (відлічуване від вертикальної осі) у вихідному положенні, при якому точки центрів тяжіння профільних перерізів лопатки лежать на одній прямій, перпендикулярній до осі двигуна;

10  $h_0$  - відносна висота лопатки, визначується співвідношенням:

$$h_0 = (h - h_1) / (h_2 - h_1),$$

де  $h$  - поточна координата поперечного перерізу профілю лопатки по висоті;

$h_1$  - координата втулкової торцевої поверхні лопатки по висоті;

$h_2$  - координата периферійної торцевої поверхні лопатки по висоті,

15 при цьому форма середньої лінії профілю кожного поперечного перерізу визначається наступним співвідношенням в ортогональній системі координат  $(x_0, y_0)$ :

$$y_{0i} = a_i \cdot x_{0i} + b_i \cdot x_{0i}^2 + c_i \cdot x_{0i}^3 + d_i \cdot x_{0i}^4 + f_i \cdot x_{0i}^5,$$

де  $x_{0i}$  - вісь абсцис, яка проходить паралельно хорді профілю,

20  $y_{0i}$  - вісь ординат, перпендикулярна до хорди профілю, плоскість  $x_0 y_0$  паралельна осі двигуна, а коефіцієнти  $a_i, b_i, c_i, d_i, f_i$  визначаються системою рівнянь:

$$\begin{cases} \text{tg}(\gamma_{1i}) = a_i \\ \text{tg}(\gamma_{1i} + \theta_i) = a_i + 2 \cdot b_i \cdot B_i + 3 \cdot c_i \cdot B_i^2 + 4 \cdot d_i \cdot B_i^3 + 5 \cdot f_i \cdot B_i^4 \\ 0 = a_i + 2 \cdot b_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right) + 3 \cdot c_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right)^2 + 4 \cdot d_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right)^3 + 5 \cdot f_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right)^4 \\ 0 = a_i \cdot B_i + b_i \cdot B_i^2 + c_i \cdot B_i^3 + d_i \cdot B_i^4 + f_i \cdot B_i^5 \\ a_i (B_i \cdot L_{1i}) + b_i (B_i \cdot L_{1i})^2 + c_i (B_i \cdot L_{1i})^3 + d_i (B_i \cdot L_{1i})^4 + f_i (B_i \cdot L_{1i})^5 = K_{1i} \\ a_i (B_i \cdot L_{2i}) + b_i (B_i \cdot L_{2i})^2 + c_i (B_i \cdot L_{2i})^3 + d_i (B_i \cdot L_{2i})^4 + f_i (B_i \cdot L_{2i})^5 = K_{2i} \\ P_{Si} \cdot (\theta_i - ((\beta_{y \text{ cтi}})_{\text{вих}} - \beta_{1\text{ri}})) + ((\beta_{y \text{ cтi}})_{\text{вих}} - \beta_{1\text{ri}}) = \gamma_{1i}, \end{cases}$$

де  $B_i$  - довжина хорди профілю;

$\overline{X_{fi}}$  - відносна абсциса максимального прогину середньої лінії профілю;

$\gamma_{1i}$  і  $\gamma_{2i}$  - кути нахилу середньої лінії профілю в точках перетину її з віссю абсцис;

25  $\theta_i$  - кут вигину профілю (кут між дотичними до середньої лінії, проведеними в точках її перетину з контуром профілю);

$P_{Si}$  - коефіцієнт, що визначає форму середньої лінії профілю, монотонно змінюється по висоті лопатки в діапазоні  $P_{Si} = (0 \div (P_{Si})_{\text{max}})$  (де  $(P_{Si})_{\text{max}}$  (значення  $P_{Si}$  при  $\gamma_{2i} \approx 0$ );

$(\beta_{y \text{ cтi}})_{\text{вих}}$  - кут установки профілю в решітці при  $P_{Si} = 0$ ;

30  $\beta_{1\text{ri}}$  - геометричний кут входу профілю в решітці;

$L_{1i}$  - константа, що вибирається в межах  $0,02 \div 0,05$ ;

$L_{2i}$  - константа, що вибирається в межах  $0,02 \div 1,0$ ;

а коефіцієнти  $K_{1i}, K_{2i}$  визначаються по співвідношеннях:

$$K_{1i} = \left[ \sqrt{\left( \frac{B_i}{2 \cdot \sin(\gamma_{1i})} \right)^2 - \left( (B_i \cdot L_{1i}) - \frac{B_i}{2} \right)^2} \right] - \frac{B_i}{2 \cdot \tan(\gamma_{1i})},$$

$$K_{2i} = \left[ \sqrt{\left( \frac{B_i}{2 \cdot \sin(\gamma_{1i})} \right)^2 - \left( (B_i \cdot L_{2i}) - \frac{B_i}{2} \right)^2} - \frac{B_i}{2 \cdot \tan(\gamma_{1i})} \right].$$

Виходячи з даної залежності:

Середня лінія профілю 10 кожного поперечного перерізу 8 лопатки направляючого апарата осьового компресора може бути дугою кола.

5 Середня лінія профілю 10 кожного поперечного перерізу 8 лопатки направляючого апарата осьового компресора може бути дугою гіперболи.

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може бути незмінне по висоті пера лопатки.

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно збільшуватися від середнього перерізу пера лопатки (при  $h_0=0,5$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0=1,0$ ).

10 Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно зменшуватися від середнього перерізу пера лопатки (при  $h_0=0,5$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0=1,0$ ).

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно збільшуватися від втулкового перерізу пера лопатки (при  $h_0=0$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0=1,0$ ).

15 Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно зменшуватися від втулкового перерізу пера лопатки (при  $h_0=0$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0=1,0$ ).

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно збільшуватися від середнього перерізу пера лопатки (при  $h_0=0,5$ ) до втулкового перерізу (при  $h_0=0$ ).

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно зменшуватися від середнього перерізу пера лопатки (при  $h_0=0,5$ ) до втулкового перерізу (при  $h_0=0$ ).

20 Довжина хорди поперечного перерізу пера лопатки направляючого апарата може монотонно зменшуватися по висоті пера від втулкового перерізу до середнього.

Довжина хорди поперечного перерізу пера лопатки направляючого апарата, може монотонно зменшуватися по висоті пера від периферійного перерізу до середнього.

25 Довжина хорди поперечного перерізу пера лопатки направляючого апарата, може монотонно зменшуватися по висоті від втулкового перерізу до середнього і монотонно зменшуватися по висоті пера від периферійного перерізу до середнього.

Довжина хорди поперечного перерізу пера лопатки направляючого апарата, може бути незмінною по висоті пера лопатки.

30 Профіль поперечного перерізу уздовж середньої лінії може бути виконаний стоншеним в області вихідної кромки.

Профіль поперечного перерізу пера лопатки може бути виконаний симетричним відносно середньої лінії.

Профіль поперечного перерізу пера лопатки може бути виконаний несиметричним відносно середньої лінії.

35 Технічним результатом, що забезпечується приведеною сукупністю ознак, є збільшення коефіцієнта відновлення повного тиску в направляючому апараті осьового компресора шляхом забезпечення безвідривного обтікання уздовж торцевих поверхонь, що приводить до підвищення ККД компресора і збільшення газодинамічної стійкості (запасу по зриву потоку).

40 На фіг. 1 - показана профільована лопатка направляючого апарату осьового компресора з боку бічної аеродинамічної поверхні розрідження;

на фіг. 2 - представлений вигляд пера лопатки направляючого апарата у складі ступеня осьового компресора на меридіональній поверхні;

на фіг. 3 - показаний поперечний переріз решітки профілів лопаток направляючого апарату в ортогональній системі координат  $(x_0, y_0)$ ;

45 на фіг. 4 - показаний вигляд лопатки направляючого апарата осьового компресора по ходу газу в ортогональній системі координат  $(y, z)$ ;

на фіг. 5а - показаний графік розподілу відносної окружної координати точок осі тороїдальної поверхні вхідної кромки 14 по висоті лопатки направляючого апарата в площині, перпендикулярній меридіональній площині, при значеннях констант  $T_1=1, T_2=0$ ;

50 на фіг. 5б - показаний графік розподілу відносної окружної координати точок осі тороїдальної поверхні вхідної кромки 14 по висоті лопатки направляючого апарата в площині, перпендикулярній меридіональній площині, при значеннях констант  $T_1=0, T_2=1$ .

55 Перо заявленої профільованої лопатки 1 направляючого апарата осьового компресора, утворене периферійною торцевою поверхнею 2 і втулковою торцевою поверхнею 3, сторонами тиску 4 і розрідження 5, сполученими зі зв'язаними між собою тороїдальними поверхнями

вхідної кромки 6 і вихідної кромки 7, і містить поперечні перерізи 8, розташовані уздовж лінії центрів тяжіння 9 профілів лопатки 1, а середня лінія 12 профілю 10 кожного поперечного перерізу 8 пера лопатки 1 уздовж лінії потоку газу 11 розташована по одну сторону хорди 13, при цьому тороїдальні поверхні вхідної кромки зв'язані між собою уздовж криволінійної осі 14, зігнутої в площині, перпендикулярній меридіональній площині лопатки  $zOx$ , а форма цієї осі має подвійний або потрійний вигин - залежно від наявності радіальної нерівномірності набігаючого потоку газу на вході у вінець лопатки, і при обертанні ротора компресора за годинниковою стрілкою 15 (вигляд по ходу газу 16) форма цієї осі визначається наступним співвідношенням:

$$\vartheta_0 = ([18,12 \cdot (h_0)^6 - 61,09 \cdot (h_0)^5 + 76,78 \cdot (h_0)^4 - 42,69 \cdot (h_0)^3 + 8,965 \cdot (h_0)^2 - 0,126 \cdot (h_0) + 0,74] \cdot T_1 + [10,65 \cdot (h_0)^6 - 34,35 \cdot (h_0)^5 + 33,05 \cdot (h_0)^4 - 2,22 \cdot (h_0)^3 - 11,2 \cdot (h_0)^2 + 4,07 \cdot (h_0) + 0,54] \cdot T_2) \cdot T_3,$$

де  $T_1$ ,  $T_2$  - константи, що приймаються рівними  $T_1 = 1$ ,  $T_2 = 0$  для направляючих апаратів перших ступенів багатоступінчастого осьового компресора, і що приймаються рівними  $T_1 = 0$ ,  $T_2 = 1$  для направляючих апаратів середніх і останніх ступенів багатоступінчастого осьового компресора,

$T_3$  - константа, що вибирається в межах  $0,1 \div 1,5$ ;

$\vartheta_{0i}$  - відносна окружна координата точки осі тороїдальних поверхонь вхідної кромки 14, визначувана співвідношенням:

$$\vartheta_{0i} = \vartheta_i / \vartheta_{\text{вихі}},$$

де  $i$  - номер поперечного перерізу по висоті пера лопатки;

$\vartheta_i$  - значення окружної координати кривої 14, відлічуване від вертикальної осі 17, перпендикулярної до осі двигуна 18;

$\vartheta_{\text{вихі}}$  - значення окружної координати кривої 14 (відлічуване від вертикальної осі 17) у вихідному положенні, при якому точки центрів тяжіння профільних перерізів лопатки лежать на одній прямій, перпендикулярній до осі двигуна 18;

$h_0$  - відносна висота лопатки, визначувана співвідношенням:

$$h_0 = (h - h_1) / (h_2 - h_1),$$

де  $h$  - поточна координата поперечного перерізу профілю лопатки по висоті;

$h_1$  - координата втулкової торцевої поверхні лопатки по висоті;

$h_2$  - координата периферійної торцевої поверхні лопатки по висоті,

при цьому форма середньої лінії 12 профілю 10 кожного поперечного перерізу 8 визначається наступним співвідношенням в ортогональній системі координат  $(x_0, y_0)$ :

$$y_{0i} = a_i \cdot x_{0i} + b_i \cdot x_{0i}^2 + c_i \cdot x_{0i}^3 + d_i \cdot x_{0i}^4 + f_i \cdot x_{0i}^5,$$

де  $x_{0i}$  - вісь абсцис, яка проходить паралельно хорді профілю,

$y_{0i}$  - вісь ординат, перпендикулярна до хорди профілю, плоскість  $x_0 O y_0$  паралельна осі

двигуна, а коефіцієнти  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$ ,  $f_i$  визначаються системою рівнянь:

$$\begin{cases} \operatorname{tg}(\gamma_{1i}) = a_i \\ \operatorname{tg}(\gamma_{1i} + \theta_i) = a_i + 2 \cdot b_i \cdot B_i + 3 \cdot c_i \cdot B_i^2 + 4 \cdot d_i \cdot B_i^3 + 5 \cdot f_i \cdot B_i^4 \\ 0 = a_i + 2 \cdot b_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right) + 3 \cdot c_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right)^2 + 4 \cdot d_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right)^3 + 5 \cdot f_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right)^4 \\ 0 = a_i \cdot B_i + b_i \cdot B_i^2 + c_i \cdot B_i^3 + d_i \cdot B_i^4 + f_i \cdot B_i^5 \\ a_i (B_i \cdot L_{1i}) + b_i (B_i \cdot L_{1i})^2 + c_i (B_i \cdot L_{1i})^3 + d_i (B_i \cdot L_{1i})^4 + f_i (B_i \cdot L_{1i})^5 = K_{1i} \\ a_i (B_i \cdot L_{2i}) + b_i (B_i \cdot L_{2i})^2 + c_i (B_i \cdot L_{2i})^3 + d_i (B_i \cdot L_{2i})^4 + f_i (B_i \cdot L_{2i})^5 = K_{2i} \\ P_{Si} \cdot (\theta_i - ((\beta_{y \text{ cтi}})_{\text{вих}} - \beta_{1i})) + ((\beta_{y \text{ cтi}})_{\text{вих}} - \beta_{1i}) = \gamma_{1i}, \end{cases}$$

де  $B_i$  - довжина хорди профілю;

$\overline{X_{fi}}$  - відносна абсциса максимального прогину середньої лінії профілю;

$\gamma_{1i}$  і  $\gamma_{2i}$  - кути нахилу середньої лінії профілю в точках перетину її з віссю абсцис;

$\theta_i$  - кут вигину профілю (кут між дотичними до середньої лінії, проведеними в точках її перетину з контуром профілю);

$P_{Si}$  - коефіцієнт, що визначає форму середньої лінії профілю, монотонно змінюється по висоті лопатки в діапазоні  $P_{Si} = (0 \div (P_{Si})_{\max})$ , де  $(P_{Si})_{\max}$  (значення  $P_{Si}$  при  $\gamma_{2i} \approx 0$ );

$(\beta_{усті})_{вих}$  - кут установки профілю в решітці при  $P_{Si} = 0$ ;

$\beta_{1i}$  - геометричний кут входу профілю в решітці;

$L_{1i}$  - константа, що вибирається в межах  $0,02 \div 0,05$ ;

$L_{2i}$  - константа, що вибирається в межах  $0,02 \div 1,0$ ;

а коефіцієнти  $K_{1i}$ ,  $K_{2i}$  визначаються по співвідношеннях:

$$K_{1i} = \left[ \sqrt{\left( \frac{B_i}{2 \cdot \sin(\gamma_{1i})} \right)^2 - \left( (B_i \cdot L_{1i}) - \frac{B_i}{2} \right)^2} \right] - \frac{B_i}{2 \cdot \tan(\gamma_{1i})},$$

$$K_{2i} = \left[ \sqrt{\left( \frac{B_i}{2 \cdot \sin(\gamma_{1i})} \right)^2 - \left( (B_i \cdot L_{2i}) - \frac{B_i}{2} \right)^2} \right] - \frac{B_i}{2 \cdot \tan(\gamma_{1i})}.$$

Середня лінія профілю 10 кожного поперечного перерізу 8 лопатками направляючого апарата осевого компресора може бути дугою кола.

Середня лінія профілю 10 кожного поперечного перерізу 8 лопатками направляючого апарата осевого компресора може бути дугою гіперболи.

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може бути незмінне по висоті пера лопатки.

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно збільшуватися від середнього перерізу пера лопатки (при  $h_0=0,5$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0=1,0$ ).

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно зменшуватися від середнього перерізу пера лопатки (при  $h_0=0,5$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0=1,0$ ).

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно збільшуватися від втулкового перерізу пера лопатки (при  $h_0=0$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0=1,0$ ).

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно зменшуватися від втулкового перерізу пера лопатки (при  $h_0=0$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0=1,0$ ).

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно збільшуватися від середнього перерізу пера лопатки (при  $h_0=0,5$ ) до втулкового перерізу (при  $h_0=0$ ).

Значення коефіцієнта  $P_{Si}$  може монотонно зменшуватися від середнього перерізу пера лопатки (при  $h_0=0,5$ ) до втулкового перерізу (при  $h_0=0$ ).

Довжина хорди 13 поперечного перерізу пера лопатки направляючого апарата може монотонно зменшуватися по висоті пера від втулкового перерізу до середнього.

Довжина хорди 13 поперечного перерізу пера лопатки направляючого апарата, може монотонно зменшуватися по висоті пера від периферійного перерізу до середнього.

Довжина хорди 13 поперечного перерізу пера лопатки направляючого апарата, може монотонно зменшуватися по висоті від втулкового перерізу до середнього і монотонно зменшуватися по висоті пера від периферійного перерізу до середнього.

Довжина хорди 13 поперечного перерізу пера лопатки направляючого апарата, може бути незмінною по висоті пера лопатки.

Профіль 10 поперечного перерізу 8 уздовж середньої лінії 12 може бути виконаний стоншеним в області вихідної кромки.

Профіль 10 поперечного перерізу 8 пера лопатки 1 може бути виконаний симетричним відносно середньої лінії 12.

Профіль 10 поперечного перерізу 8 пера лопатки 1 може бути виконаний несиметричним відносно середньої лінії 12.

Ступінь компресора визначається як сукупність рядів лопаток ротора і статора. В процесі роботи ротор компресора обертається, як правило, за годинниковою стрілкою, як показано на фіг. 2, при цьому потік газу, що входить із швидкістю  $C_2$  в міжлопаткові канали направляючого апарата, відхиляється до осевого напрямку, його закручування зменшується і на виході з

міжлопаткових каналів направляючого апарата швидкість потоку стає рівною  $C_3$ , як показано на фіг. 3.

Вигин лінії центрів тяжіння 9 профілів лопатки 1 (подвійний або потрійний - залежно від наявності радіальної нерівномірності набігаючого потоку газу на вході у вінець лопатки, як показано на фіг. 5), виконаний відповідно до даної корисної моделі, приводить до утворення тупого кута в місці перетину сторони розрідження 5 лопаток з торцевими поверхнями 2 і 3, і, як наслідок, до зменшення розмірів відривних зон на втулці і периферії. Застосування аеродинамічно оптимальної форми середньої лінії 12 профілю 10 кожного поперечного перерізу 8 лопаток 1 приводить до зменшення градієнтності потоку газу на виході з міжлопаткових каналів направляючого апарату. Поєднання вказаних ефектів сприяє зниженню втрат повного тиску в направляючому апараті і приводить до підвищення ККД багатоступінчастого осьового компресора на робочому режимі роботи і збільшення запасу газодинамічної стійкості.

Підвищення термодинамічних параметрів робочого процесу сучасних ГТД до значень  $\pi_k^* = 35 \dots 45$ ,  $T_r^* = 1600 \dots 1800 \text{ K}$  з прийнятними ККД компресорів вимагає підвищення ККД їх рівнів до значень  $\pi_{ст}^* = 0,92 \dots 0,9$ , з одночасним підвищенням коефіцієнтів напору, що досягається шляхом обчислення тривимірного характеру обтікання вінців лопаток при оптимізації їх профілювання.

## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

1. Лопатка направляючого апарата осьового компресора, перо якої утворене периферійною і втулковою торцевими поверхнями, сторонами тиску і розрідження, сполученими зі зв'язаними між собою тороїдальними поверхнями вхідної і вихідної кромки, і містить поперечні перерізи, розташовані уздовж лінії центрів тяжіння профілів лопатки, середня лінія профілю кожного поперечного перерізу пера лопатки уздовж лінії потоку газу розташована по одну сторону хорди, яка **відрізняється** тим, що тороїдальні поверхні вхідної кромки пера лопатки зв'язані між собою уздовж криволінійної осі, зігнутої в плоскості, перпендикулярній меридіональній плоскості лопатки, а форма цієї осі має подвійний або потрійний вигин - залежно від наявності радіальної нерівномірності набігаючого потоку газу на вході у вінець лопатки, і при обертанні ротора компресора за годинниковою стрілкою (вигляд по ходу газу) форма цієї осі визначається наступним співвідношенням:

$$\vartheta_0 = ([18,12 \cdot (h_0)^6 - 61,09 \cdot (h_0)^5 + 76,78 \cdot (h_0)^4 - 42,69 \cdot (h_0)^3 + 8,965 \cdot (h_0)^2 - 0,126 \cdot (h_0) + 0,74] \cdot T_1 + [10,65 \cdot (h_0)^6 - 34,35 \cdot (h_0)^5 + 33,05 \cdot (h_0)^4 - 2,22 \cdot (h_0)^3 - 11,2 \cdot (h_0)^2 + 4,07 \cdot (h_0) + 0,54] \cdot T_2) \cdot T_3,$$

де  $T_1$ ,  $T_2$  - константи, що приймаються рівними  $T_1 = 1$ ,  $T_2 = 0$  для направляючих апаратів перших ступенів багатоступінчастого осьового компресора, і що приймаються рівними  $T_1 = 0$ ,  $T_2 = 1$  для направляючих апаратів середніх і останніх ступенів багатоступінчастого осьового компресора,  $T_3$  - константа, що вибирається в межах  $0,1 \dots 1,5$ ;

$\vartheta_{0i}$  - відносна окружна координата точки осі тороїдальних поверхонь вхідної кромки, визначувана співвідношенням:

$$\vartheta_{0i} = \vartheta_i / \vartheta_{вихі},$$

де  $i$  - номер поперечного перерізу по висоті пера лопатки;

$\vartheta_i$  - значення окружної координати кривої - осі тороїдальних поверхонь вхідної кромки, відлічуване від вертикальної осі, перпендикулярної до осі двигуна;

$\vartheta_{вихі}$  - значення окружної координати кривої - осі тороїдальних поверхонь вхідної кромки, відлічуване від вертикальної осі у вихідному положенні, при якому точки центрів тяжіння профільних перерізів лопатки лежать на одній прямій, перпендикулярній до осі двигуна;

$h_0$  - відносна висота лопатки, визначувана співвідношенням:

$$h_0 = (h - h_1) / (h_2 - h_1),$$

де  $h$  - поточна координата поперечного перерізу профілю лопатки по висоті;

$h_1$  - координата втулкової торцевої поверхні лопатки по висоті;

$h_2$  - координата периферійної торцевої поверхні лопатки по висоті,



при цьому форма середньої лінії профілю кожного поперечного перерізу визначається наступним співвідношенням в ортогональній системі координат  $(x_0, y_0)$ :

$$y_{0i} = a_i \cdot x_{0i} + b_i \cdot x_{0i}^2 + c_i \cdot x_{0i}^3 + d_i \cdot x_{0i}^4 + f_i \cdot x_{0i}^5,$$

де  $x_{0i}$  - вісь абсцис, яка проходить паралельно хорді профілю,

5  $y_{0i}$  - вісь ординат, перпендикулярна до хорди профілю,

плоскість  $x_0 O y_0$  паралельна осі двигуна, а коефіцієнти  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$ ,  $f_i$  визначаються системою рівнянь:

$$\begin{cases} \operatorname{tg}(\gamma_{1i}) = a_i \\ \operatorname{tg}(\gamma_{1i} + \theta_i) = a_i + 2 \cdot b_i \cdot B_i + 3 \cdot c_i \cdot B_i^2 + 4 \cdot d_i \cdot B_i^3 + 5 \cdot f_i \cdot B_i^4 \\ 0 = a_i + 2 \cdot b_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right) + 3 \cdot c_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right)^2 + 4 \cdot d_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right)^3 + 5 \cdot f_i \cdot \left( \frac{X_{fi}}{B_i} \right)^4 \\ 0 = a_i \cdot B_i + b_i \cdot B_i^2 + c_i \cdot B_i^3 + d_i \cdot B_i^4 + f_i \cdot B_i^5 \\ a_i(B_i \cdot L_{1i}) + b_i(B_i \cdot L_{1i})^2 + c_i(B_i \cdot L_{1i})^3 + d_i(B_i \cdot L_{1i})^4 + f_i(B_i \cdot L_{1i})^5 = K_{1i} \\ a_i(B_i \cdot L_{2i}) + b_i(B_i \cdot L_{2i})^2 + c_i(B_i \cdot L_{2i})^3 + d_i(B_i \cdot L_{2i})^4 + f_i(B_i \cdot L_{2i})^5 = K_{2i} \\ P_{Si} \cdot (\theta_i - ((\beta_{ycti})_{вих} - \beta_{1pi})) + ((\beta_{ycti})_{вих} - \beta_{1pi}) = \gamma_{1i} \end{cases}$$

де  $B_i$  - довжина хорди профілю;

10  $\overline{X_{fi}}$  - відносна абсциса максимального прогину середньої лінії профілю;

$\gamma_{1i}$  і  $\gamma_{2i}$  - кути нахилу середньої лінії профілю в точках перетину її з віссю абсцис;

$\theta_i$  - кут вигину профілю (кут між дотичними до середньої лінії, проведеними в точках її перетину з контуром профілю);

$P_{Si}$  - коефіцієнт, що визначає форму середньої лінії профілю, монотонно змінюється по висоті

15 лопатки в діапазоні  $P_{Si} = (0 \div (P_{Si})_{\max})$ , де  $(P_{Si})_{\max}$  - значення  $P_{Si}$  при  $\gamma_{2i} \approx 0$ );

$(\beta_{ycti})_{вих}$  - кут установки профілю в решітці при  $P_{Si} = 0$ ;

$\beta_{1pi}$  - геометричний кут входу профілю в решітці;

$L_{1i}$  - константа, що вибирається в межах  $0,02 \div 0,05$ ;

$L_{2i}$  - константа, що вибирається в межах  $0,02 \div 1,0$ ;

20 а коефіцієнти  $K_{1i}$ ,  $K_{2i}$  визначаються по співвідношеннях:

$$K_{1i} = \left[ \sqrt{\left( \frac{B_i}{2 \cdot \sin(\gamma_{1i})} \right)^2 - \left( (B_i \cdot L_{1i}) - \frac{B_i}{2} \right)^2} \right] - \frac{B_i}{2 \cdot \tan(\gamma_{1i})},$$

$$K_{2i} = \left[ \sqrt{\left( \frac{B_i}{2 \cdot \sin(\gamma_{1i})} \right)^2 - \left( (B_i \cdot L_{2i}) - \frac{B_i}{2} \right)^2} \right] - \frac{B_i}{2 \cdot \tan(\gamma_{1i})}.$$

2. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що середня лінія профілю кожного поперечного перерізу є дугою кола.

25 3. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що середня лінія профілю кожного поперечного перерізу є дугою гіперболи.

4. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що значення коефіцієнта  $P_{Si}$  незмінне по висоті пера лопатки.

5. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що значення коефіцієнта  $P_{Si}$  монотонно збільшується від середнього перерізу (при  $h_0 = 0,5$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0 = 1,0$ ).

30 6. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що значення коефіцієнта  $P_{Si}$  монотонно зменшується від середнього перерізу (при  $h_0 = 0,5$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0 = 1,0$ ).

7. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що значення коефіцієнта  $P_{Si}$  монотонно збільшується від втулкового перерізу (при  $h_0 = 0$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0 = 1,0$ ).

8. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що значення коефіцієнта  $P_{Si}$  монотонно зменшується від втулкового перерізу (при  $h_0 = 0$ ) до периферійного перерізу (при  $h_0 = 1,0$ ).
9. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що значення коефіцієнта  $P_{Si}$  монотонно збільшується від середнього перерізу (при  $h_0 = 0,5$ ) до втулкового перерізу (при  $h_0 = 0$ ).
- 5 10. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що значення коефіцієнта  $P_{Si}$  монотонно зменшується від середнього перерізу (при  $h_0 = 0,5$ ) до втулкового перерізу (при  $h_0 = 0$ ).
11. Лопатка за будь-яким із пп. 1-10, яка **відрізняється** тим, що довжина хорди поперечного перерізу пера лопатки, що сполучає поверхні вхідної і вихідної кромки, монотонно зменшується по висоті пера від втулкового перерізу до середнього.
- 10 12. Лопатка за будь-яким із пп. 1-10, яка **відрізняється** тим, що довжина хорди поперечного перерізу пера лопатки, що сполучає поверхні вхідної і вихідної кромки, монотонно зменшується по висоті пера від периферійного перерізу до середнього.
13. Лопатка за будь-яким із пп. 1-10, яка **відрізняється** тим, що довжина хорди поперечного перерізу пера лопатки, що сполучає поверхні вхідної і вихідної кромки, монотонно зменшується по висоті пера від втулкового перерізу до середнього і монотонно зменшується по висоті пера від периферійного перерізу до середнього.
- 15 14. Лопатка за будь-яким із пп. 1-10, яка **відрізняється** тим, що довжина хорди поперечного перерізу пера лопатки, що сполучає поверхні вхідної і вихідної кромки, незмінна по висоті пера лопатки.
- 20 15. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що профіль поперечного перерізу уздовж середньої лінії стоншений в області вихідної кромки.
16. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що профіль поперечного перерізу симетричний відносно середньої лінії.
- 25 17. Лопатка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що профіль поперечного перерізу несиметричний відносно середньої лінії.

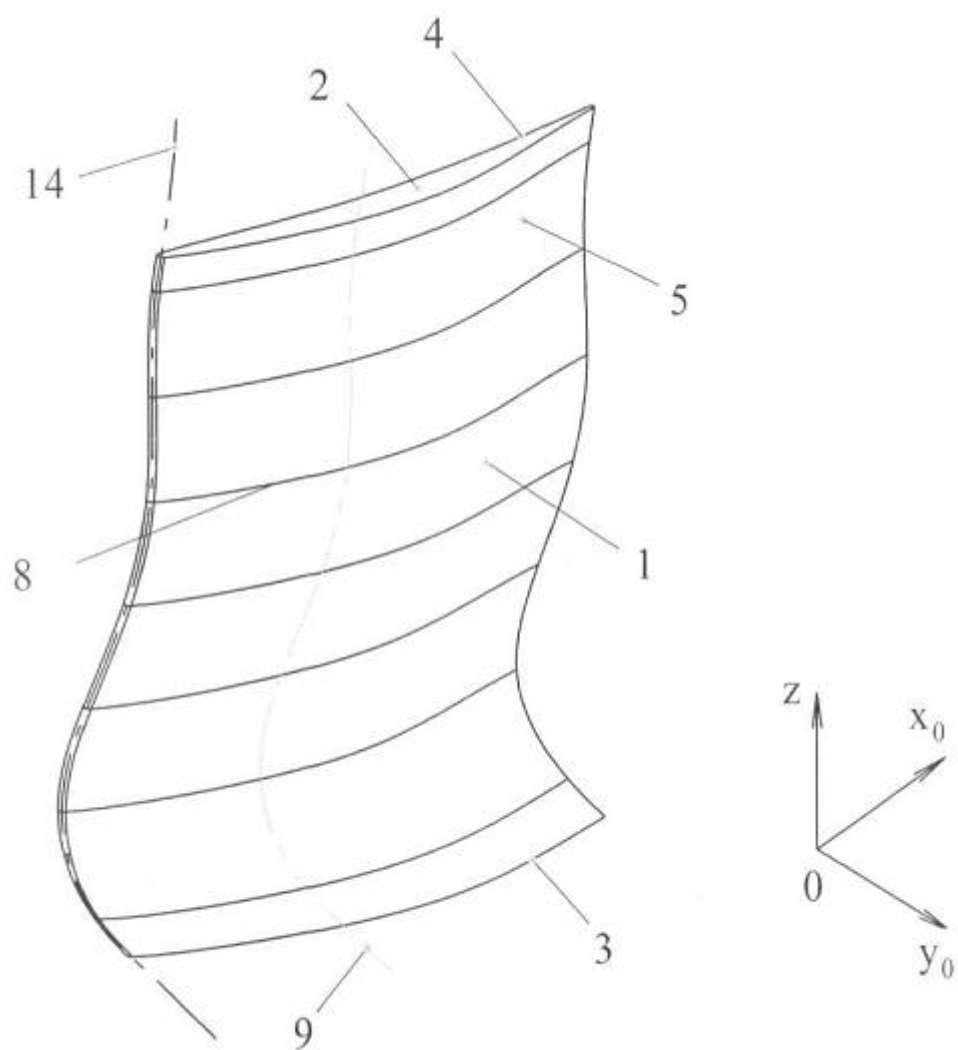


Fig. 1

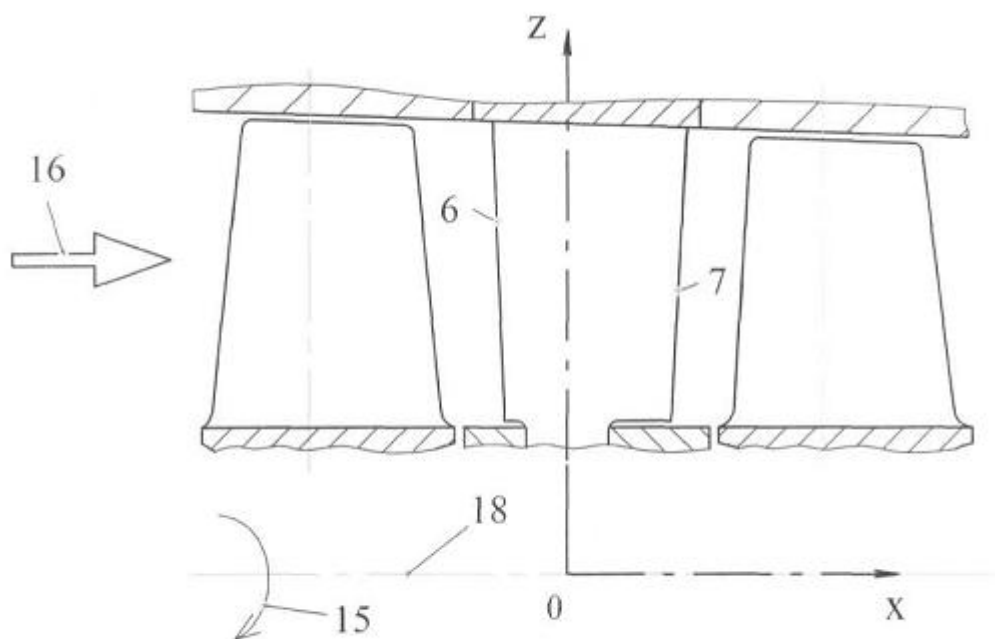


Fig. 2

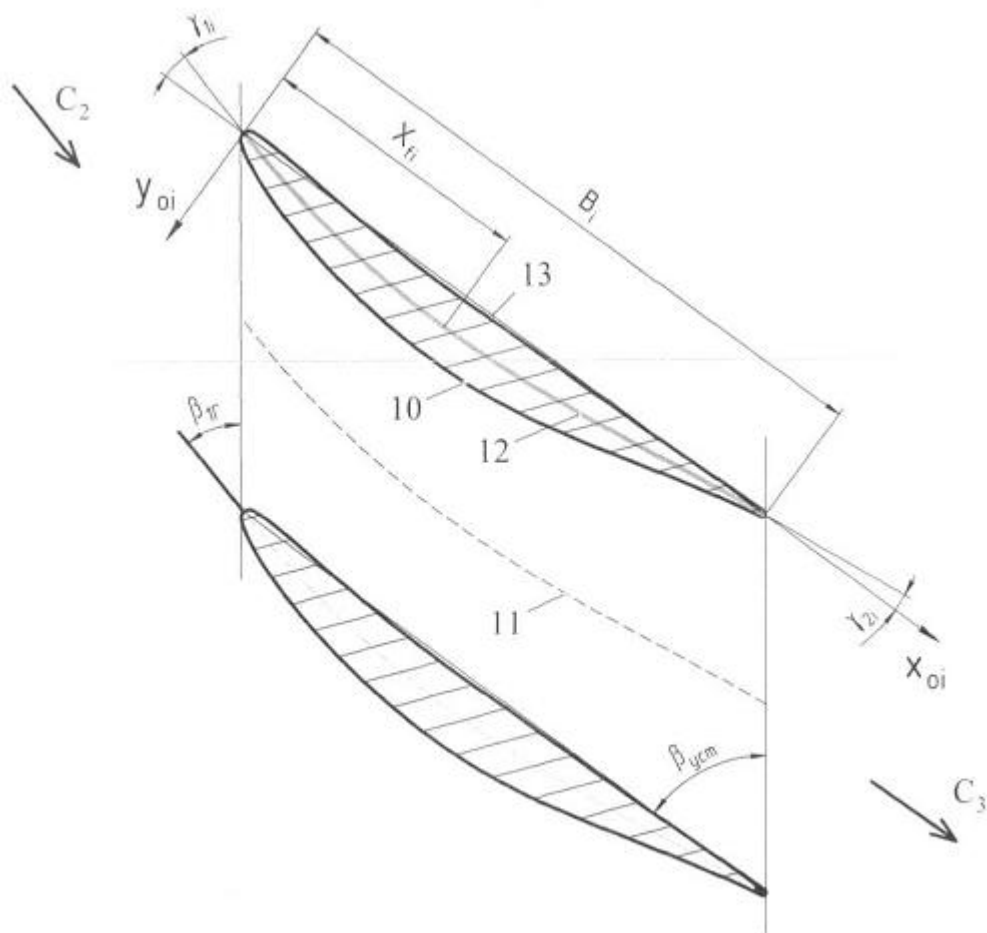


Fig. 3

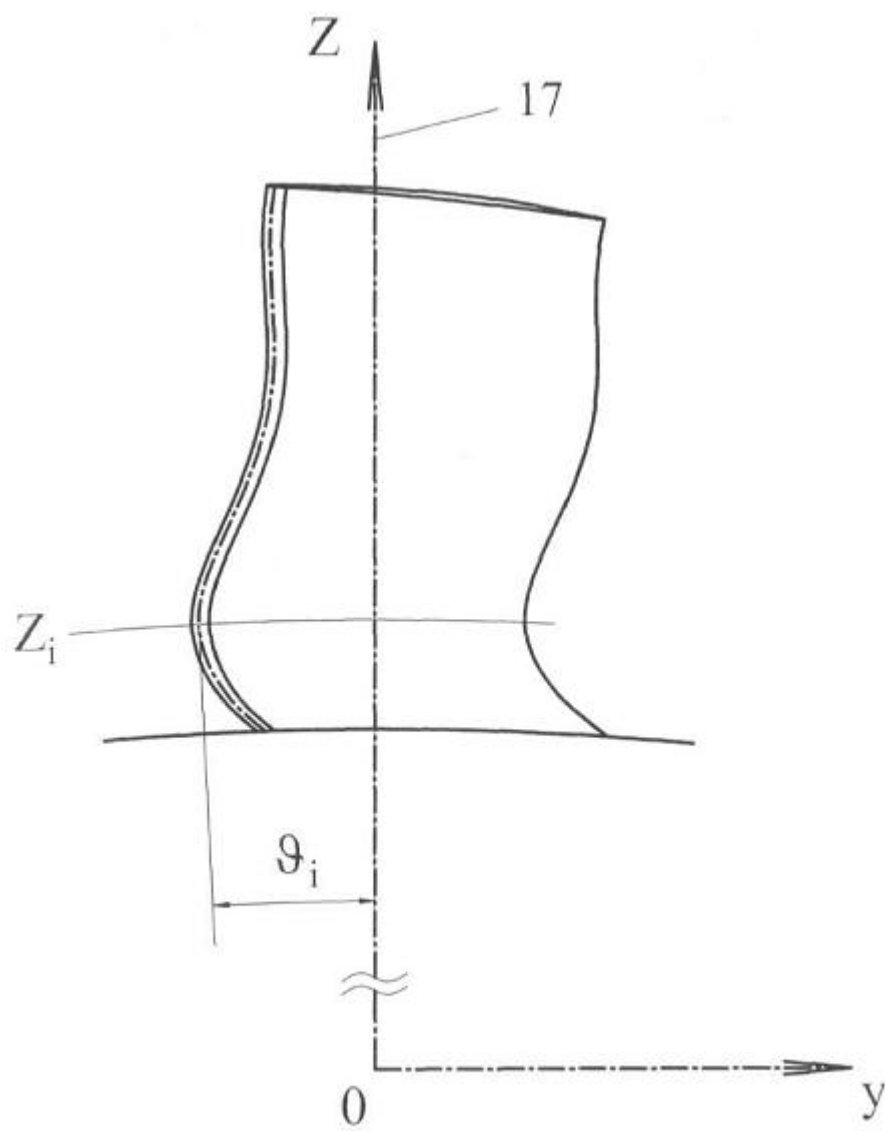
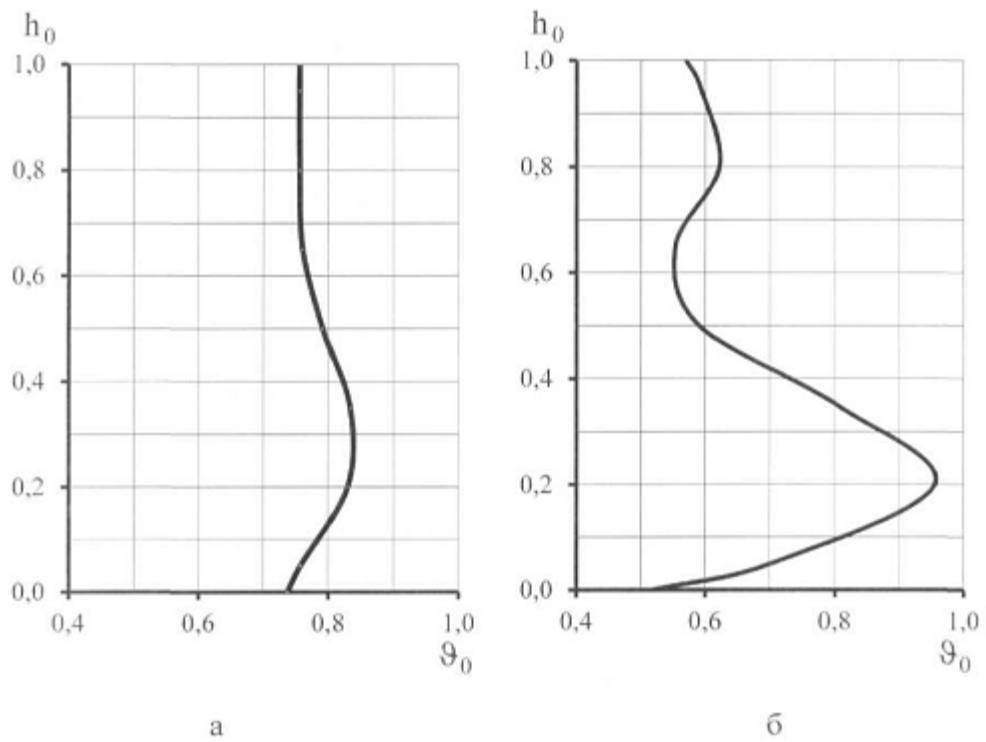


Fig. 4



Фиг. 5

---

Комп'ютерна верстка М. Мацело

---

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

---

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601